

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

KATEDRA TVÁŘENÍ MATERIÁLU



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Optimalizace průvlastkové řady při tažení drátu za studena

Optimization of die pass design for cold wire drawing

Zadání bakalářské práce

Student: **Kamil Klepáč**
Studijní program: B2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109R034 Technologie tváření a úpravy materiálu
Téma: Optimalizace průvlekové řady při tažení drátu za studena
Optimization of die pass design for cold wire drawing

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Bekaert-popis technologie tažení
3. Teorie tažení – vliv technologických parametrů tažení na výsledné vlastnosti drátu
4. Návrh experimentu a cíle práce
5. Analýza výsledků
6. Diskuse a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ENGHAG, P. *Steel wire technology*, Repro Örebro University, 2008, ISBN 91-631-1962-5.
- [2] MARCOL, J. *Tažený ocelový drát- 1 a 2 díl*, ŽDB 1996.
- [3] KNAP, F., KRUZEL, R., CIEŚLAK, Ł. Ciągnięcie drutów, prętów i rur, Politechnika Częstochowska, prace dydaktyczne, *Metalurgia*, Nr. 36, 2004, ISBN 83-87745-17-0.
- [4] *Wire Forming Technology International*, www.wireformingtech.com.
- [5] *Wire Journal International*, official publication of the Wire association international, www.wirenet.org.

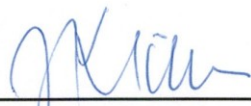
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Richard Fabík, Ph.D.**

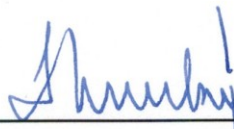
Konzultant bakalářské práce: Ing. Karel Dobrovolný

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 30.04.2013


prof. Ing. Jiří Klíber, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou práci (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 5. Obsah BP |
| 2. Zásady pro vypracování BP | 6. Textová část BP |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy |

ad 1) Titulním listem je originál zadání BP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za titulním listem. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah BP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na

ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 7) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Bakalářská práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2012/2013.

Ostrava 30. 11. 2012

Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ведо́мí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ведо́мí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě ... 30.4.2013

..... Kamil Klepáček
podpis (jméno a příjmení studenta)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval panu doc. Ing. Richardu Fabíkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a cenné připomínky v průběhu zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Karlu Dobrovolnému ze společnosti Beakert Bohumín s.r.o. a Ing. Janu Marciniakovi za spolupráci a poskytnutí potřebných informací.

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na tažení nízkouhlíkového drátu přes standardní a upravenou průvlakovou sadu. Hlavní náplní této práce je porovnání výsledných hodnot: teploty a průměru drátu, množství zbytkového maziva na drátě, pevnosti a houževnatosti drátu. Výsledné hodnoty byly získány měřením ze vzorků drátu odebraných v průběhu tažení. Teoretická část popisuje princip teorie tažení drátu a vliv vybraných činitelů na vlastnosti taženého drátu. Praktická část se zabývá zpracováním a vzájemným posouzením naměřených hodnot. Celkové zhodnocení, provozní doporučení a návrhy jsou vyjádřeny v závěrečné části práce.

Klíčová slova: nízkouhlíkový drát, průvlaková sada, tažení drátu, geometrie průvlaku, tlakový průvlak, mechanické vlastnosti.

ABSTRACT

The thesis is focused on drawing low carbon wire through standard and customized series of dies. The main concern of this study is to compare the resulting values: temperature and wire diameter, the amount of residual lubricant on the wire, the strength and toughness of the wire. The resulting values were obtained by measuring the wire samples collected during the drawing. The theoretical part describes the basic theory of wire drawing and the influence of selected factors on the properties of wire. The practical part deals with the processing of a mutual assessment of the measured values. Overall evaluation, operational recommendations and suggestions are presented in the final part.

Keywords: low carbon wire, series of dies, wire drawing, geometry of die, pressure die, mechanical properties.

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. PROFIL SPOLEČNOSTI	2
2.1 BEKAERT	2
2.2 BEKAERT BOHUMÍN S.R.O.	2
3. TAŽENÍ OCELOVÉHO DRÁTU	3
3.1 TEORIE TAŽENÍ DRÁTŮ	3
3.2 ROZDĚLENÍ NAPĚTÍ V PRŮVLAKU	5
3.3 ROZBOR DEFORMACE V PRŮVLAKU A JEHO GEOMETRIE	6
3.4 ROZBOR NAPJATOSTI	8
3.5 POVRCHOVÁ ÚPRAVA OCELOVÉHO DRÁTU	10
3.5.1 <i>Tvorba okují a proces odokujení</i>	10
3.5.2 <i>Povrchová úprava</i>	11
4. VLIV VYBRANÝCH ČINITELŮ NA VLASTNOSTI TAŽENÉHO DRÁTU.....	13
4.1 VLIV OBSAHU UHLÍKU, DÍLČÍCH A CELKOVÝCH ÚBĚRŮ A POČTU TAHŮ	13
4.2 VLIV GEOMETRIE PRŮVLAKU	15
4.2.1 <i>Optimální tažný úhel 2α</i>	15
4.2.2 <i>Delta parametr Δ</i>	15
4.3 VLIV OHŘEVU DRÁTU.....	18
4.4 VLIV PŘÍMÉHO OCHLAZENÍ DRÁTU NA ZVYŠOVÁNÍ DÍLČÍCH ÚBĚRŮ	18
4.5 VLIV RYCHLOSTI TAŽENÍ, KONSTRUKCE DRÁTOTAHU A CHLAZENÍ DRÁTU.....	19
5. NÁVRH A CÍLE EXPERIMENTU.....	20
5.1 POPIS EXPERIMENTU	20
5.1.1 <i>Standardní průvlastková sada</i>	21
5.1.2 <i>Upravená průvlastková sada</i>	23
6. VÝSLEDNÉ HODNOTY	25
6.1 TEPLOTA	25
6.2 ZBYTKOVÉ MAZIVO	27
6.3 PRŮMĚR (OPOTŘEBENÍ SADY)	29
6.4 PEVNOST V TAHU	31
6.5 KRUTY	35
7. ZÁVĚR A PROVOZNÍ DOPORUČENÍ.....	39
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	41

1. ÚVOD

Tažené ocelové dráty a jejich výrobky mají značný význam a široké užití pomalu ve všech průmyslových odvětvích. Hlavně v automobilovém, strojírenském, či stavebním průmyslu, dále taky v oblasti zemědělství, energetiky apod. Díky hromadné výrobě a velké konkurenci v oblasti tažení drátu jsou kladeny stále vyšší nároky na kvalitu a bezesporu také na cenu taženého ocelového drátu. Proto není překvapením, že je snaha docílit těchto úspor i přímo v oblasti samotného procesu tažení drátu. Musíme mít ovšem na paměti, že při jakémkoliv zásahu do procesu výroby je vždy velmi důležité, aby nedošlo ke snížení kvality výsledného výrobku.

Teoretická část bakalářské práce popisuje princip tažení drátu, rozdělení napětí a rozbor deformace v průvlastku a také proces povrchové úpravy válcovaného drátu před tažením. Dále se v rámci teoretického rozboru zabýváme vlivem vybraných činitelů na vlastnosti drátu a to zejména vlivem geometrie průvlastku a velikosti dílčích úběrů.

Hlavní náplní praktické části práce je popis a vyhodnocení rozsáhlého poloprovozního experimentu, jenž byl proveden ve firmě Bekaert Bohumín s.r.o. Experiment spočíval v tažení drátu průměru 6,5 mm na 2,385 mm na dvou rozdílných průvlastkových sadách. Sada 1 je standardem firmy Bekaert pro tažení drátu a druhá byla upravena (snížení počtu tahů, změna dílčích úběrů a odstranění většiny tlakových průvlastků při tažení). Účelem bylo posoudit do jaké míry má úprava průvlastkové sady vliv na výsledné fyzikální a mechanické vlastnosti drátu a opotřebení průvlastků. Cílem celé bakalářské práce je porovnat výsledné hodnoty měření, získané ze vzorků drátu v průběhu tažení, a zjistit, zda lze bez obav v technologické praxi dále používat námi navržené úpravy průvlastkové sady, což by vedlo k určitým finančním a časovým úsporám a také k usnadnění činnosti obsluhy drátotahu.

Všechny naměřené výsledné hodnoty jsou zpracovány v poslední kapitole, kde je možno nejlépe z grafického zobrazení vysledovat jejich vzájemnou závislost.

2. PROFIL SPOLEČNOSTI

2.1 Bekaert

Firmu Bekaert založil roku 1880 pan Leo Leander Bekaerta dnes je z ní nadnárodní společnost, jejíž hlavní sídlo se nachází v Belgii. Ve společnosti je celosvětově zaměstnáno okolo 27 000 lidí a její různorodé průmyslové výrobky jsou dodávány do 120 zemí. Společnost provozuje výrobní podniky převážně v Latinské Americe, Evropě, Asii a Pacifiku a neposledně také v Severní Americe. Výrobky společnosti Bekaert nacházejí svá uplatnění v širokém spektru průmyslového odvětví, např.: automobilový průmysl (ocelové kordy, nebo dráty a vlákna na výrobu autosedaček), stavební průmysl (dramix - ocelová vlákna do betonu), spotřební průmysl a dále v průmyslových odvětvích zabývajících se energetikou, zemědělstvím, apod. Ve střední Evropě se nachází čtyři výrobní podniky, a to na Slovensku (Bekaert Slovakia s.r.o. a Bekaert Hlohovec a.s.) a v České Republice (Bekaert Petrovice s.r.o. a Bekaert Bohumín s.r.o.).

2.2 Bekaert Bohumín s.r.o.

Podnik Bekaert Bohumín se zabývá výrobou tažených drátů a následně drátů pozinkovaných a výrobou svařovaných panelů.

Výroba pozinkovaných drátů začala v roce 1998 na jedné pozinkovací lince. V roce 2004 byla nainstalována druhá pozinkovací linka a další drátotahy. Tažírna, převážně s drátotahy typu Jupiter B a BAZ - (OBX) je výrobní část provozu zajišťující dodávání rozměrově a pevnostně potřebných polo produktů pro pozinkovací linky. Výrobky v podobě svitek pozinkovaných drátů požadovaného rozměru, náběru zinku a požadovaných mechanických vlastností se dodávají převážně na zahraniční trh a to jak do zemí EU, tak i do zámoří. Jejich současné využití je např.: materiál na stavbu plotů, drát pro stavebnictví, drát pro výrobu zvířecích klecí, nebo pro výrobu nastřelovacích hřebíků atd.

Nejmladší výrobní části provozu je linka na výrobu svařovaných panelů, která byla nainstalována v roce 2011. Výrobky v podobě svařovaných panelů, jsou používány k výrobě gabionových košů a plotů a jsou expedovány jak na tuzemský, tak samozřejmě i na zahraniční trh.

Hlavním cílem firmy Bekaert je vyrábět produkty té nejvyšší kvality, a v co nejkratších termínech je dodávat všem svým náročným zákazníkům [1].






















3. TAŽENÍ OCELOVÉHO DRÁTU

Výroba taženého ocelového drátu probíhá tvářením za studena. Základní polotovar je válcovaný drát o průměru nad 5 mm, popřípadě již předtažený drát vyroben tažením za studena. Samotná výroba je velmi složitá, neboť čítá velký počet technologických operací jakou jsou např. povrchová úprava drátu před tažením, tažení, tepelné zpracování, či pokovování.

Ocelový válcovaný a tažený drát můžeme rozdělit do tří skupin:

- drát s nízkým obsahem uhlíku (do 0,3 %) - nepatentovaný drát,
- drát s vysokým obsahem uhlíku (od 0,3 % až 1,0 %) - patentovaný drát,
- drát z ušlechtilých slitinových ocelí.

Základní materiálový tok výroby nepatentovaného drátu vyjadřuje **obr. 1**.

Válcovaný drát					
Moření, povrch. úprava					
První tažení					
Žihání					
Druhé tažení					
Zinkování					
Tažený drát	tvrdý, holý	měkký, holý	tvrdý, pozink.	tvrdý, holý	měkký, pozink.

Obr. 1. Materiálový tok vybraných druhů nepatentovaného ocelového drátu [2].

3.1 Teorie tažení drátů

Tažení drátu za studena je tvářecí proces, při němž se protahuje polotovar kuželovým otvorem v průvleku. Při tomto procesu dochází k prodlužování délky drátu ve směru tažení a zmenšování plochy příčného průřezu. Také se mění mechanické vlastnosti drátu, a to zvyšování pevnosti, tvrdosti meze pružnosti a průtažnosti a snižování jeho plastických vlastností, např. prodloužení, zúžení. Výrobek dosahuje přesných rozměrů a vyznačuje se vysokou jakostí povrchu. Plastická deformace při tažení drátu probíhá za takových teplot, při nichž tvářením vyvolané zpevnění drátu zůstává zachováno.

Základním zákonem, který musí být při procesu tažení dodržen, aby nedocházelo k přetrhům drátu, je zákon zachování objemu drátů procházejících průvlastky za jednotku času.

$$S_0 \cdot L_0 = S_1 \cdot L_1 = S_2 \cdot L_2 = \dots = S_n \cdot L_n \quad (1)$$

a nebo

$$S_0 \cdot v_0 = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \dots = S_n \cdot v_n \quad (2)$$

kde $S_0, S_1, S_2 \dots$ až S_n jsou průřezy drátu

$L_0, L_1, L_2 \dots$ až L_n jsou délky drátu

$v_0, v_1, v_2 \dots$ až v_n jsou rychlosti drátu

K plastické deformaci při tažení drátu dochází přímo v kuželové části průvlastky s tažným úhlem 2α , **obr. 2**.

Na povrchu průvlastky délky l působí v pásmu deformace příčná síla Q jenž je vyvolána účinkem vnější tahové síly F . Vliv na působení příčné síly má tažný úhel kužele a tření mezi povrchem drátu a pracovní částí průvlastky ve vztahu k vertikální složce síly N pod úhlem $\alpha + \rho$.

Z trojúhelníku můžeme určit základní rovnici pro tahovou sílu:

$$F = Q \cdot \sin(\alpha + \rho) \quad (3)$$

$$F = N \cdot \tan(\alpha + \rho) \quad (4)$$

kde d_0, d_1 jsou vstupní a výstupní průměr drátu

2α je úhel tažné části průvlastky

ρ je třecí úhel

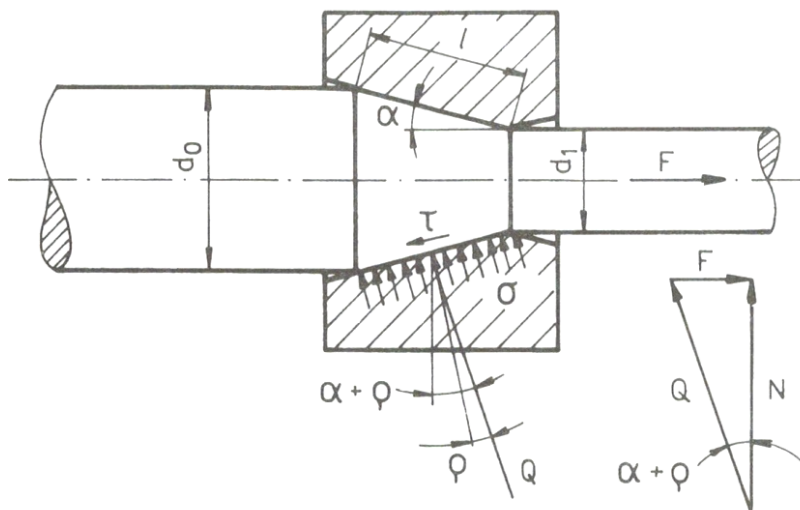
τ je smykové napětí

σ je střední tlakové napětí

F je tahová síla

Q je příčná síla

Jelikož se tažný úhel 2α většinou používá v rozpětí od 10^0 do 20^0 a třecí koeficient $\mu = \operatorname{tg} \rho$ mívá při dobrém mazání hodnoty pod 0,05 ($\rho < 3^0$), dosahuje velikost příčné síly 4 a 7 násobku hodnoty síly tahové [3,4].



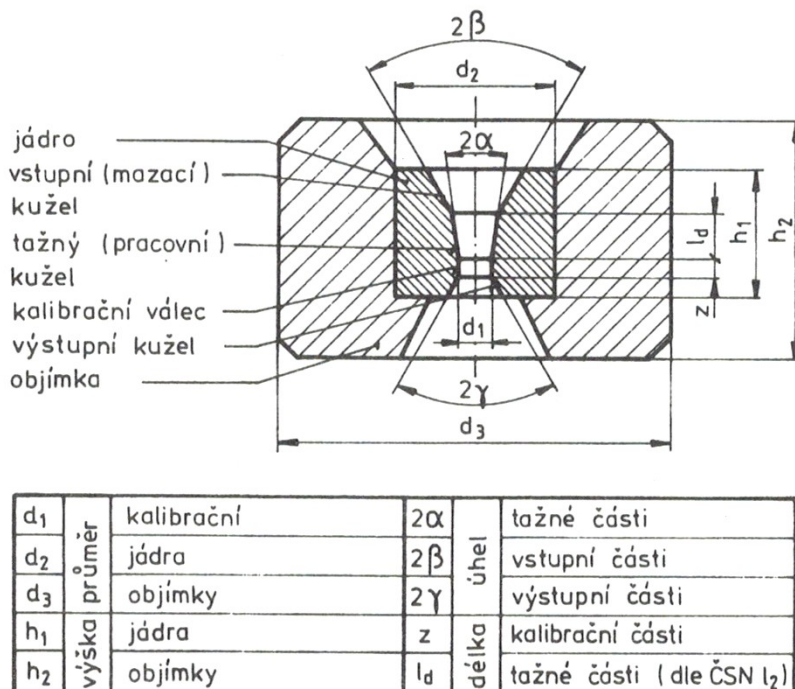
Obr. 2. *Rovnováha sil v otvoru průvleku podle E.Siebela [4].*

3.2 Rozdělení napětí v průvleku

Pro výpočet tažných sil a také pro návrh a hodnocení technologického postupu má velký význam znalost stavů napjatosti v pásmu deformace v kuželovém průvleku a jejich matematická analýza. Komplikovaný matematický rozbor úlohy je způsoben neshodnými směry hlavních os napjatosti s geometrickými osami pásma deformace, jenž je způsobeno geometrickou povahou pochodu a tangenciálním napětím vyvolaným vnějším třením. Tento faktor ovlivňuje hlavně mechanickou podmínku plastičnosti při tažení, kterou potom nemůžeme vyjádřit jednoduchými matematickými vztahy pro základy plasticity. Jelikož je v pevném průvleku vyvolán tříosý stav napjatosti s tlakovými napětími v příčném směru, můžeme při tažení dosáhnout dostatečně velkých deformací. U materiálu kruhového průřezu se jedná o všestranně radiální tlak. Podmínkou k vyvolání potřebných plastických deformací a tedy změn průměru drátu je dostatečně velký všestranně radiální tlak. Nicméně největší hlavní napětí je tahové napětí působící v podélném směru vyvolané účinkem tažné síly. To značí, že v tříosém stavu napjatosti převládají napětí v tahu, což snižuje velikost plastické deformace. Další faktor, jenž omezuje velikost plastické deformace je způsoben zpevňováním kovu při tažení za studena [4,5].

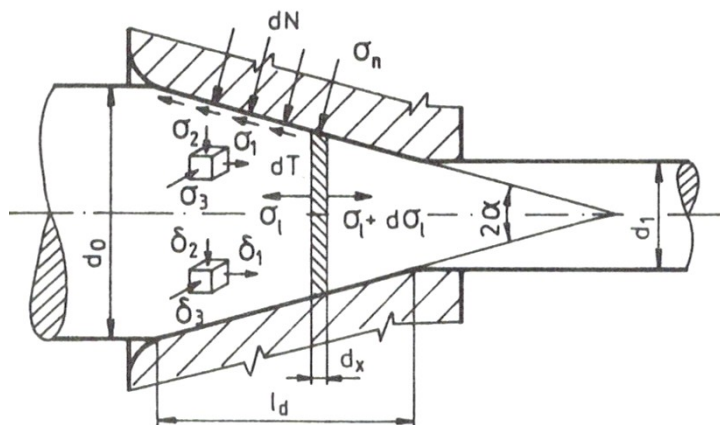
3.3 Rozbor deformace v průvlastku a jeho geometrie

K samotné deformaci drátu při tažení dochází v kuželovité části průvlastku, která přechází ve válcovou kalibrační část, kde materiál získává požadovaný rozměr (viz **obr. 3**).



Obr. 3. Části tvrdokovového průvlastku.

V pásmu deformace působí na povrchu taženého drátu elementární normálové tlaky d_N a elementární třecí síly $d_T = \mu \cdot d_N$. Tyto síly mají prvořadý vliv na celkový stav napjatosti v pásmu deformace. V kalibrační části průvlastku je působení třecích sil a normálových tlaků výrazně menší, a proto neovlivňují průběh deformace ve vlastním pásmu deformace. Na **obr. 4** vidíme v kuželovité deformační části libovolný příčný element materiálu, který má nekonečně malou tloušťku d_x . Na něj působí na povrchu normálové napětí σ_n a napětí tečné $\tau = \mu \cdot \sigma_n$. V příčných řezech dochází k působení podélného tahového napětí σ_l a $(\sigma_l + d\sigma_l)$, jenž není rozděleno rovnoměrně. Tlakové napětí σ_0 působí ve směru obvodovém.



Obr. 4. Podstata tažení v průvleku.

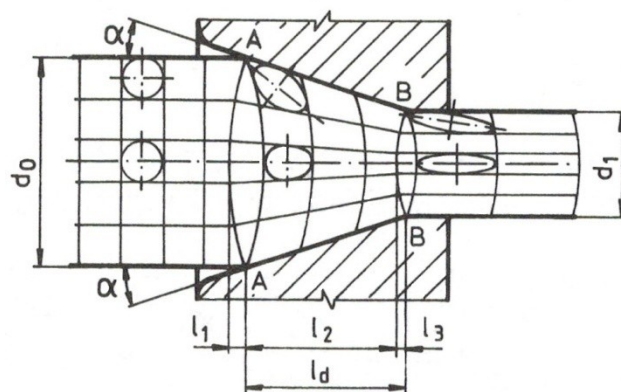
Tříosý stav napjatosti, vyznačující se v jakémkoliv bodě části pásma deformace je určen těmito hlavními napětími:

- tahové napětí podélné σ_1 , které je napětím největším,
- tlakové napětí radiální σ_2 ,
- tlakové napětí působícím v obvodovém směru σ_3 , které je napětím nejmenší.

Tomuto tříosému stavu napjatosti odpovídá tříosý stav hlavních deformací:

$$+\sigma_1; -\sigma_2; -\sigma_3 \qquad +\epsilon_1; -\epsilon_2; -\epsilon_3$$

Na deformaci kružnic v podélných osových řezech můžeme pozorovat velikost podélné deformace, které znázorňují elementární částice kovu (viz **obr. 5**). Původní čtvercová síť se deformuje způsobem, že dochází k jejímu protažení ve směru tažení a ke zkrácení ve směru radiálním. Rovněž i její vepsané kružnice, které se mění v elipsy se protahují ve směru tažení a zkracují ve směru radiálním. Hlavní osy kružnic, které byly původně rovnoběžné s osou tažení a kolmé na tuto osu, mění v průběhu tažení svůj sklon vzhledem k této ose, s výjimkou elementů, ležících v ose tažení.



Obr. 5. Tok materiálu v pásmu deformace.

Podélné deformace v libovolných příčných průřezech nejsou rozloženy rovnoměrně, což zobrazuje zkosení obrazců výchozí čtvercové sítě a zakřivování jejich stran. Také znázorněné deformace vepsaných kružnic jsou toho důkazem. To značí, že se jedná o nehomogenní podélnou deformaci.

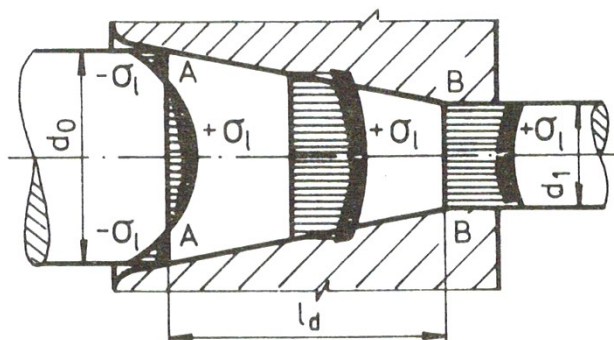
Pásmo deformace se rozděluje na tři úseky (viz **obr.5**):

Úsek o délce l_1 , nám představuje vstupní část a drát v této oblasti ještě nepodstupuje deformaci. Tvar a velikost tohoto úseku závisí na vstupním a výstupním průměru d_0 a d_1 , na tažném úhlu 2α , velikosti úběru a na vnějším tření. Úsek l_1 je od úseku l_2 oddělen plochou Γ_1 , v jejíž oblasti dochází ke změně rychlosti ve směru tažení.

Prostřední úsek o délce l_2 , představuje podstatnou část pásma l_d . V tomto úseku dochází k vlastní deformaci, tedy k redukci průřezu drátu. Úsek l_2 a poslední úsek o délce l_3 odděluje plocha Γ_2 . V úseku l_3 dochází k vyrovnání rychlosti dílčích vláken a končí redukce průřezu taženého drátu [4, 6].

3.4 Rozbor napjatosti

Rozbory napjatosti v materiálu při zkoušce tahem potvrzují, že u drátu kruhového průřezu bychom mohli vycházet z jednotvárnosti rozdělení podélných složek napětí σ_l v různých příčných řezech pásma deformace. Tyto složky ovšem nemají stejnou velikost a charakter jejich průběhu se v příčných řezech mění od vstupního k výstupnímu průřezu pásma deformace (viz **obr. 6**).

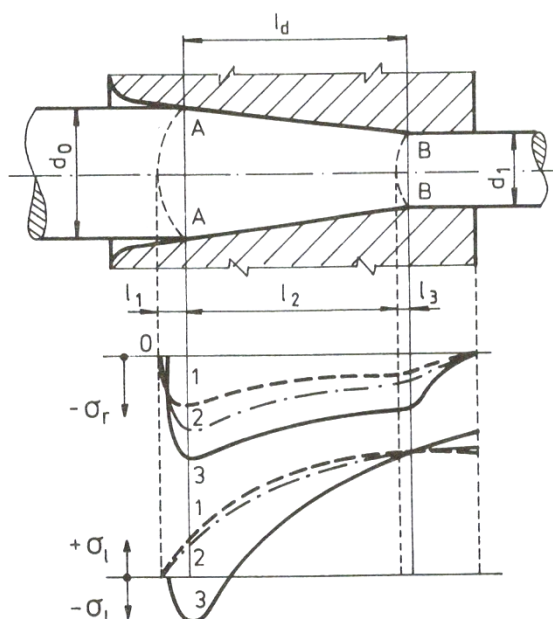


Obr. 6. *Průběh podélných napětí σ_l v příčných řezech pásma deformace l_d .*

Stav napjatosti s napětím σ_l můžeme v pásmu počátku elastických deformací považovat za homogenní, odpovídající vznikající elastické deformaci. V oblasti vznikající plastické deformace, působí na povrchové vrstvy tlaková napětí $-\sigma_l$, která mohou vyvolat i napěchování kovu, avšak vnitřní vlákna jsou už vystavena tahovým složkám $+\sigma_l$. Maximum v osovém vláknu v jakémkoli příčném průřezu ve středu pásma deformace dosahují jen podélné tahové složky $+\sigma_l$. Naopak ve výstupním průřezu pásma deformace, kde jsou také jen tahové složky $+\sigma_l$ vykazují maxima jen povrchová vlákna.

Tlakové složky radiálního a obvodového napětí v jednotlivých příčných řezech se musí rovnat, tedy $\sigma_r = \sigma_\theta$.

Po délce pásma deformace zůstává jejich průběh ve všech vrstvách stejný. **Obr. 7** představuje tři křivky radiálního $-\sigma_r$ a podélného napětí σ_l a to průběh napětí v osové vrstvě - křivka 1, v mezilehlé vrstvě - křivka 2 a v povrchové vrstvě - křivka 3. Tlakové radiální napětí má největší hodnoty v povrchové vrstvě, jenž je v kontaktu s průvlekem a zmenšuje se směrem k ose tažení. Následkem elastické deformace se v úseku l_l projevují radiální tlaková napětí dříve v osových vrstvách, což si také můžeme vysvětlit díky průběhu radiálních elastických deformací přenášených mezi jednotlivými vrstvami kovu. Podélná napětí σ_l vykazují v jednotlivých vrstvách odlišný průběh. Již od začínající elastické deformace vznikají v průřezu v osové vrstvě podélná napětí tahová. V povrchové vrstvě jsou to ovšem zpočátku podélná napětí tlaková a až v následujícím úseku pásma deformace nastává přechod na napětí tahová. K celkovému vyrovnání všech vrstev podélného napětí dochází ve výstupním průřezu. Ovšem povrchové vrstvy v průřezu výstupu materiálu z kalibrační části průvleku jsou vystaveny většímu tahovému napětí než osové vrstvy (viz **obr.6**) [4,5].



Obr. 7. *Průběh radiálních a podélných napětí v pásmu deformace [4].*

3.5 Povrchová úprava ocelového drátu

Kvalita taženého drátu závisí na vlastnostech drátu válcovaného a na všech fázích výrobního procesu. Válcovaný drát, jenž je ve většině případu tažení drátu vstupním polotovarem, je třeba před užitím ještě upravit.

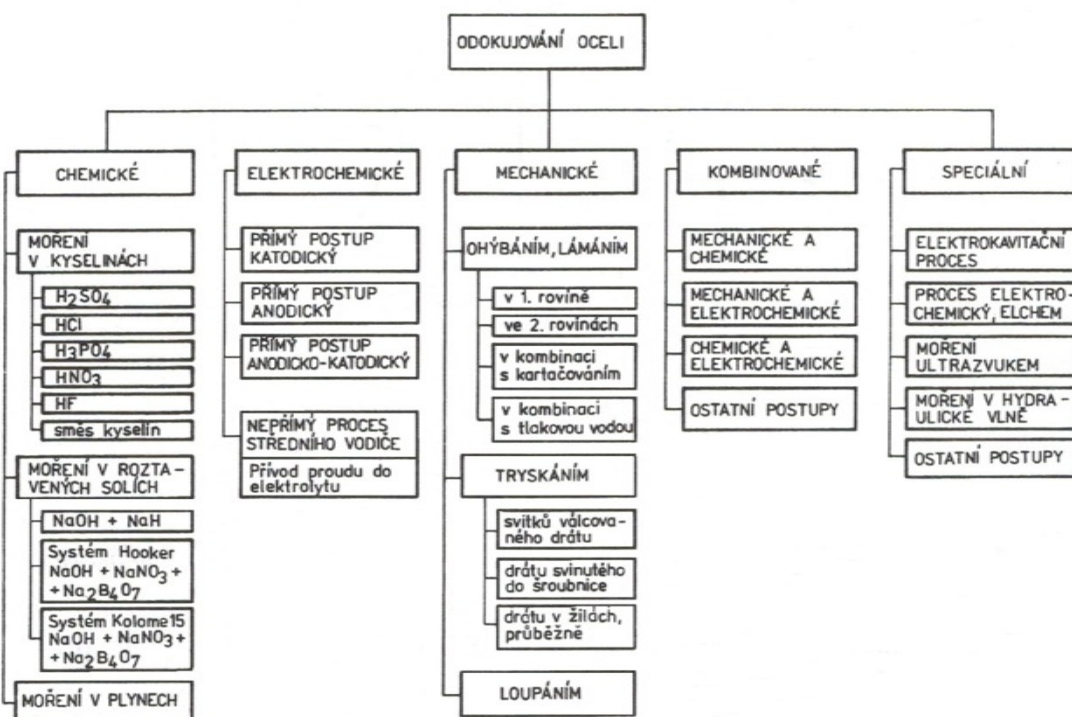
3.5.1 Tvorba okují a proces odokujení

Následkem koroze oceli je tvorba okují a rzi na jejím povrchu, přičemž dochází k samovolnému narušení povrchu oceli vlivem recipročního elektrochemického a chemického působení s okolním prostředím. Okuje jsou tedy vrstvy oxidu formované na povrchu drátu v následujícím pořadí. Přímě na povrchu drátu se nachází wüstit (FeO), dále magnetit (Fe_3O_4) a nakonec vrstva hematitu (Fe_2O_3).

Rez se na povrchu ocelového drátu vyskytuje převážně ve dvou případech, a to při nevhodném skladování drátu a při nedostatečné neutralizaci a oplachu povrchu, popřípadě nedostatečnou protikorozi ochranou po moření.

Při procesu odokujování podléhají okuje chemickému, mechanickému, nebo tepelnému působení látek, či zařízení s cílem získat kovově čistý povrch. Také může dojít ke kombinaci těchto působení [7].

Různé procesy odstraňování okují popisuje **obr. 8**.



Obr. 8. Metody odstraňování okujů z oceli [4].

Chemické odokujování je prováděno mořením ocelového drátu na mořicích linkách. Moření celých svitků drátu probíhá v mořicích vanách (viz **obr. 9**), nebo dochází k moření drátu v žilách, ve šroubovicích, popřípadě ve smyčkách. Moření drátu je z 90% prováděno v kyselině sírové a kyselině chlorovodíkové. Kyselina sírová rozpouští okuje pomaleji než kyselina chlorovodíková o stejné koncentraci. Rozpustnost železa v poměru k oxidům při moření v kyselině sírové je 1:4. Pro snížení rozpouštění základního kovu se užívají inhibitory, které zpomalují reakci mezi kovem a kyselinou.

Mechanické odokujování probíhá ohýbáním drátu v žilách s následným kartáčováním povrchu drátu pro odstranění zbytků okujů. Další proces mechanického odokujování je tryskání drátu v žilách, svitcích, nebo ve šroubovici.

3.5.2 Povrchová úprava

Po moření následuje další proces úpravy povrchu drátu s cílem vytvořit povlak, který funguje jako nosič maziva. Nejprve, a to okamžitě po vytažení drátu z mořicí lázně je potřeba provést vodní oplach. Cílem oplachování je zajistit odstranění zbytku mořidla a dokonalou čistotu povrchu drátu, nezbytnou pro další procesy.

Další operací je nanášení různých druhů nosiče maziva, které ve spojení s mazivem vylepšují proces tažení a zvyšují kvalitu povrchu taženého drátu.

Základní druhy nosičů maziv jsou:

- nosiče maziv s mechanickou přilnavostí: vápno a borax,
- nosiče maziv s mechanickou vazbou na kov: fosfáty,
- kovové povlaky: měď a zinek.

Metoda vápnění je finančně nejúspornější povrchovou úpravou drátu pro tažení.

Vápnění povrchu drátu má dvě významné úlohy:

- neutralizace kyselých zbytků po moření,
- tvorba nosné vrstvy pro mazivo užívané v procesu tažení.

Boraxování je cenově dražší a vrstva boraxu na povrchu drátu je s porovnáním s vrstvou vápna souvislejší, pevnější a aktivnější k používaným mazivům.

Ještě nákladnějším procesem je fosfátování a užívá se zejména při výrobě ocelového patentovaného drátu [7,9].

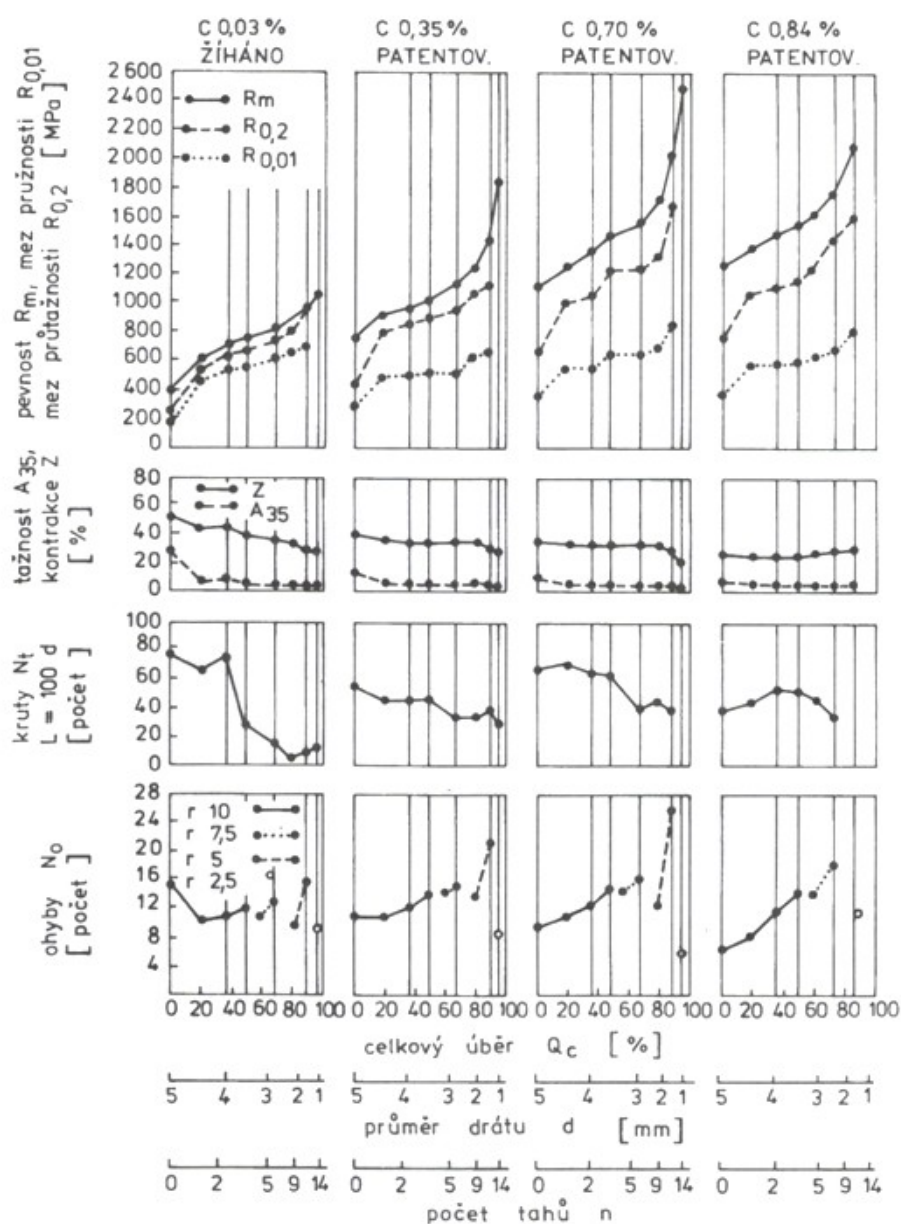


Obr. 9. *Mořící linka na svitky drátu - vápnění [9].*

4. VLIV VYBRANÝCH ČINITELŮ NA VLASTNOSTI TAŽENÉHO DRÁTU

4.1 Vliv obsahu uhlíku, dílčích a celkových úběrů a počtu tahů

Jestliže se navyšuje obsah uhlíku v oceli dochází ke zvýšení pevnosti válcovaného drátu a také pevnosti patentovaného drátu. Roste tedy i pevnost taženého drátu v závislosti na celkovém úběru a to v souladu s popisovanými principy deformačního zpevnění viz **obr. 10**.



Obr. 10. Vliv tažení (velikosti úběru) při tažení na mechanické vlastnosti ocelového drátu podle Pompa a Knackstedta.

Při procesu tažení drátu se používají různé dílčí úběry Q_d , různé celkové úběry Q_c (viz **tab. 1**) a tím pádem i různý počet tahů n . Výběr velikosti úběrů a počtů tahů se odvíjí od technologie tažení, technologického zařízení pro tažení drátu, chemického složení výchozího materiálu a požadovaných vlastnostech taženého drátu.

Tab. 1. *Vyjadřuje výpočtové vzorce Q_d a Q_c .*

Název	Jednotka	Vzorec
Dílčí úběr	(%)	$Q_d = \left[\frac{S_0 - S_1}{S_0} \right] \cdot 100 = \left[\frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2} \right] \cdot 100$
Celkový plošný úběr	(%)	$Q_c = \left[\frac{S_0 - S_n}{S_0} \right] \cdot 100 = \left[1 - \left(\frac{100 - Q_d}{100} \right)^n \right] \cdot 100$

Výběr maximální hodnoty dílčího úběru Q_d závisí na plastičnosti materiálu, jeho struktuře, na zbytkových pnutí, na předcházejícím zpevnění, na podmínkách deformace, mazivu, teplotě, rychlosti apod.

Při použití vysokých dílčích úběrů se tažením vyvolané tahové napětí v drátu za průvlekem přibližuje k mezi kluzu kovu a tím k plastické deformaci drátu za průvlekem, což v konečném důsledku vede k přetržení drátu.

V praxi to znamená, že také při tažení ocelí s vysokou plasticitou je důležité volit dílčí úběry menší než 40 %. Při užití hodně malých dílčích úběrů cca 5 až 6 % dochází ke zvýšení nerovnoměrnosti deformace v průřezu taženého drátu.

Minimální hodnoty celkového úběru $Q_{c,min}$ závisí na požadovaných mechanických a technologických vlastnostech taženého ocelového drátu, na vlastnostech výchozího materiálu a na technologiích tažení.

Větší velikost celkového úběru je stanovena lepší plastičností materiálu, kvalitou maziva a způsobem mazání, také kvalitou povrchu polotovaru a průvleků. Z praxe je známo, že při překročení horní hranice celkového úběru obvykle dochází ke zvýšení křehkosti a výraznému snížení houževnatosti taženého drátu.

V **tab. 2** můžeme vidět dílčí a celkové plošné úběry a počty tahů používané při vícenásobném tažení nepatentovaného ocelového drátu a **tab. 3** dokumentuje dílčí a celkové plošné úběry a počty tahů pro tažení ocelového patentovaného drátu [4,8].

Tab. 2. *Dílčí a celkové plošné úběry a počet tahů používané při tažení ocelového nepatentovaného drátu.*

Průměr drátu	Plošný úběr		Počet tahů
d_n	Q_d	Q_c	n
[mm]	%		-
0,7	16 - 26	87 - 92	9 - 11
1,0	18 - 39	84 - 97	7 - 9
1,6	20 - 44	83 - 92	5 - 8
2,2	20 - 41	81 - 85	4 - 7
2,8	24 - 41	68 - 75	3 - 4
3,8	20 - 42	52 - 66	2 - 3
6,0	26,6 - 36	26,6 - 36	1

Tab. 3. *Dílčí a celkové plošné úběry a počet tahů používané při tažení ocelového patentovaného drátu.*

Průměr drátu	Plošný úběr		Počet tahů
d_n	Q_d	Q_c	n
(mm)	(%)		(-)
1,0	16 - 26	83 - 92	8 - 12
1,6	16 - 26	83 - 94	8 - 11
2,2	18 - 26	82 - 92	7 - 10
2,8	19 - 25	70 - 90	5 - 9
5,0	20 - 25	70 - 80	4 - 7

4.2 Vliv geometrie prův laku

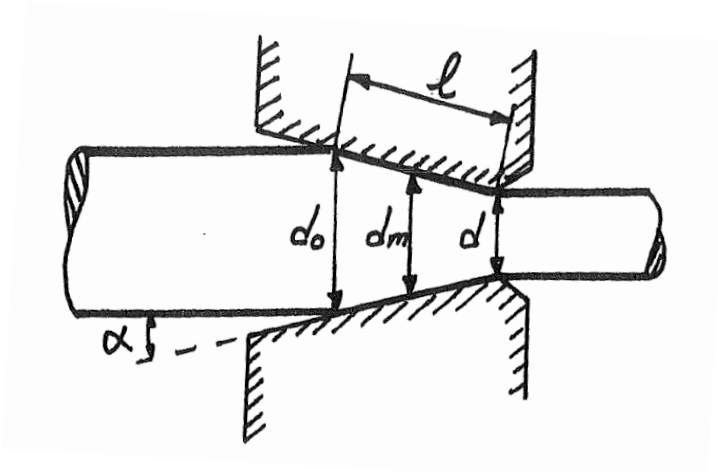
4.2.1 Optimální tažný úhel 2α

Výběr správného tažného úhlu 2α je velmi důležitý pro zdárný proces tažení. S ohledem na skutečnost, že s klesajícím úhlem 2α roste tření třecí síly a s rostoucím úhlem 2α dochází ke zvýšení nadbytečné práce, je třeba vybírat tažný úhel 2α tak, aby bylo dosaženo rovnováhy mezi třením a ztrátovou prací, což potvrdilo mnoho výzkumů [10].

4.2.2 Delta parametr Δ

Základním nástrojem pro tažení ocelového drátu je prův lak a jeho geometrie je jedním z klíčových činitelů ovlivňujících proces tažení. Delta parametr je definován jako poměr středního průměru deformujícího se drátu d_m k deformační délce l (viz **obr. 11**) a jeho

výsledné hodnoty lze použít k výběru optimálního tažného úhlu 2α v závislosti na velikosti dílčího úběru Q_d .



Obr. 11. Deformační délka l a střední průměr d_m deformujícího se drátu v průvleku [11].

Vzorec pro výpočet delta parametru:

$$\Delta = \frac{d_m}{l} = \sin \alpha \left(\frac{d_0 + d_1}{d_0 - d_1} \right) \quad (5)$$

a nebo

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} \left[1 + \sqrt{1 - r} \right]^2 \quad (6)$$

kde d_m je střední průměr deformujícího se drátu

l je deformační délka

α je polovina úhlu tažné části průvleku

d_0, d_1 jsou vstupní a výstupní průměr drátu

r je redukce

V rovnici (6) je úhel α vyjádřen v radiánech. Redukce r se počítá jako $Q_d/100$.

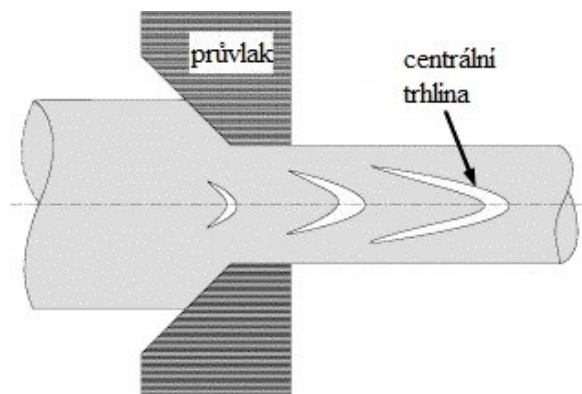
Tažení s nízkými hodnotami delta parametru se vyznačuje velkým třením a vysokým nárůstem teploty mezi drátem a povrchem deformačního pásma průvleku. Tažný úhel 2α je malý a dílčí úběry jsou vysoké. Dodržovat nízké hodnoty Δ je důležité hlavně u prvního úběru.

Vysoké hodnoty delta parametru Δ se vyznačují zvýšeným stupněm ztrátové deformace a povrchovým zpevněním. Tažný úhel 2α je velký a dílčí úběry jsou malé. Hodnoty delta parametru v závislosti na polovičním tažném úhlu α a dílčích úběrech vidíme v **tab. 4**.

Tab. 4. Hodnoty delta parametru pro různé úhly α a dílčí úběry Q_d .

polovina tažného úhlu α (°)	dílčí úběry Q_d (%)							
	5	10	15	20	25	30	35	40
2	2,72	1,33	0,86	0,63	0,49	0,39	0,33	0,27
4	5,44	2,65	1,72	1,25	0,97	0,78	0,65	0,55
6	8,17	3,98	2,58	1,88	1,46	1,18	0,98	0,82
8	10,89	5,3	3,44	2,51	1,94	1,57	1,3	1,1
10	13,61	6,63	4,3	3,13	2,43	1,96	1,63	1,37
12	16,33	7,95	5,16	3,76	2,92	2,35	1,95	1,65
14	19,06	9,28	6,02	4,38	3,4	2,75	2,28	1,92
16	21,78	10,6	6,88	5,01	3,89	3,14	2,6	2,2
18	24,5	11,93	7,74	5,64	4,38	3,53	2,93	2,47
20	27,22	13,26	8,6	6,26	4,86	3,92	3,25	2,75

Nejpříznivější deformaci při tažení vykazují hodnoty $\Delta = 1$. Dle J. G. Wistreicha [11] jsou příznivé hodnoty delta parametru pod 1,25 a nízká hodnota je obzvlášť důležitá pro první úběr při tažení. V praxi se doporučují hodnoty $\Delta < 1,5$. Vysoké hodnoty delta parametru vedou k nepříznivé deformaci a v praxi se nedoporučuje hodnota delta parametru vyšší než 3. Vyšší hodnoty Δ vedou k nehomogenně normálové deformaci po průřezu drátu a tím k rozdílnému tečení povrchových a středových vrstev drátu, které vede ke vzniku centrálních trhlin tvaru V (viz **obr. 12**) [10,11].



Obr. 12. Schéma vzniku centrálních trhlin [12].

Část prův laku, kde již deformace neprobíhá je kalibrační válec, který upravuje finální rozměr taženého materiálu. V rozsahu malých a středních úběrů do 25 % se vlivem prodloužení délky kalibračního válce prův laků zvyšuje požadavek na deformační práci v průběhu tažení [8].

4.3 Vliv ohřevu drátu

Faktory ovlivňující růst teploty drátu při tažení jsou jakost válcovaného drátu, tedy jeho chemické složení, drsnost povrchu, struktura či průměr a technologicky proces a podmínky při tažení.

V průběhu tažení dochází ke zvyšování teploty drátu a prův laku, a to hlavně vlivem přeměny deformační práce a vnějšího tření v teplo. Ohřev drátu způsobují také pracovní podmínky v průběhu tažení drátu. Můžeme vycházet z experimentu, kde bylo zjištěno, že asi z 90 až 95 % se čistá deformační práce mění v teplo. Zbývajících 5 až 10 % je vynášeno drátem jako zvýšená latentní energie.

Jestliže teplota taženého drátu překoná hodnoty 150 až 200 °C, dojde ke zhoršení jeho vlastností.

Z testů podle A. Pompa a W. Knackstedta vyplývá, že u drátu s obsahem uhlíku 0,7 % se s rostoucí teplotou zvyšuje mez pevnosti a také mez kluzu. Zvýšení pevnosti je pomalejšího charakteru.

V průběhu tažení je ovšem drát mezi jednotlivými úběry ochlazován na tažných válcích, a proto nelze definitivně stanovit jeho teplotní poměry.

Na ohřev drátu působí i řada dalších faktorů jako jsou např.: dostatečné, či nedostatečné chlazení válců a prův laků, geometrie prův laků, tedy velikost tažného úhlu a délka kalibrační části, mazivo a nosič maziva, nebo velikost dílčího a celkového úběru.

Vysoké hodnoty dílčího a celkového úběru vedou ke zvýšení teploty drátu a naopak.

Teploty taženého drátu by v provozních podmínkách neměly přesahovat 150 až 200 °C [4].

4.4 Vliv přímého ochlazení drátu na zvyšování dílčích úběrů

Konstrukce drátotahu, jeho technický stav a bezproblémové chlazení drátu a prův laku při tažení má obrovský význam pro výrobu ocelového drátu potřebné jakosti. Stávající

nepřímé chlazení drátu, které je na starších typech drátotahu není hlavně po určité době provozu stroje dostatečné, což při dané rychlosti tažení negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti drátu. Proto dochází ke zlepšení nepřímého chlazení drátu progresivními konstrukcemi drátotahu a zavedením přímého chlazení drátu vodou.

Zvyšování dílčího úběru při tažení na starších, technicky nevyhovujících drátotazích má nepříznivý vliv na vlastnosti drátů. Dochází ke zvýšení tažné síly, což se může projevit růstem teplot drátů a v důsledku deformačního stárnutí materiálu a může dojít ke zvýšení pevnosti drátu a k poklesu počtu ohybů a krutů do lomu.

Problematické zvyšování dílčích úběrů je ovšem věnována menší pozornost, což je hlavně z hlediska ekonomiky při hromadné výrobě taženého ocelového drátu zarážející. Moderní drátotahy s výborným chlazením drátu umožňují zvyšování dílčích úběrů a snížení počtu tahů při tažení, aniž by došlo k zhoršení požadované kvality drátu. Což samozřejmě vede k určitým finančním úsporám a ke snížení požadavků na zastavěnou plochu. Další výhodou je snížení spotřeby energie a zlepšení obsluhy stroje a tím také zvýšení produktivity práce [4].

4.5 Vliv rychlosti tažení, konstrukce drátotahu a chlazení drátu

Jestliže při výrobě hlavně vysokouhlíkového ocelového drátu dochází k problémům s dosažením požadovaných počtů ohybů a krutů, snižuje se běžně tažná rychlost drátotahu a to na takovou hodnotu, při níž počty ohybů a krutů budou dostačující.

K tomuto problému očividně dochází vznikem vysokých teplot drátu v průběhu tažení zpravidla následkem nesouladu mezi provozovanou tažnou rychlostí a velikostí nepřímého chlazení drátu na tažných válcích.

Moderní konstrukce drátotahu s dobrým chlazením drátu zajišťuje, že rychlost tažení nemá v průběhu tažení velký vliv na kvalitu taženého drátu [8].

5. NÁVRH A CÍLE EXPERIMENTU

Tažení drátu ve firmě Bekaert probíhá podle stanovené technologie na standardních předepsaných průvlekových sadách. Pro každý úběr je v průvlekové kazetě použit jak tažný průvlak, tak průvlak tlakový.

Provozní experiment vychází ze standardní průvlekové sady, která byla mírně pozměněna. Úprava obnáší změnu velikosti dílčích úběrů a snížení počtu tahů o jeden. Celkový plošný úběr zůstal stejný. Kromě prvního tahu, nebyly v průvlekových kazetách použity tlakové průvlakky. Užívání tlakových průvlaků je spojeno s finančními náklady na jejich oběh (vyčištění, přešetření a následná kontrola rozměru). Experiment má ukázat, zda lze bez obav v technologické praxi dále používat námi navržené úpravy průvlekové sady, což by vedlo k určitým finančním a časovým úsporám a také k usnadnění činnosti obsluhy drátotahu.

V průběhu experimentu bylo zpracováno 42 302 kg materiálu, což je při požadovaném finálním rozměru téměř 1 206 kilometrů drátu. Polovina materiálu byla tažena přes standardní průvlekovou sadu. Druhá polovina byla tažena přes sadu upravenou. Drátotah, rychlost tažení a druh maziva zůstaly stejné v průběhu zpracování celého objemu materiálu.

Přes standardní průvlekovou sadu bylo tedy tažením zpracováno 21 151 kg válcovaného drátu, což je ve finále téměř 603 km drátu požadovaného průměru.

Stejný objem materiálu byl zpracován tažením přes upravenou průvlekovou sadu. Výstupní průměr drátu je identický jako u standardní sady a tedy i zde byla natažena stejná délka drátu.

Cílem této práce je porovnat hodnoty teplot, průměrů drátů, hmotnosti zbytkového maziva na drátě a hodnoty pevností a krutů, jenž byly získány v průběhu tažení na standardní a upravené průvlekové sadě.

5.1 Popis experimentu

Na vícenásobném drátotahu typu BAZ (OBX) s vertikálně uloženými bubny (viz **obr. 13**) byl tažen válcovaný nízkouhlíkový drát s obsahem uhlíku 0,05 %, jakosti A46D, chemického složení (viz **tab. 5**) a vstupním průměrem 6,5 mm na finální rozměr 2,385 mm.

Tab. 5. *Chemické složení materiálu A46D.*

C	Mn	Si	P	S	Cu	N	Cr	Sn
≤0,05	0,25-0,4	≤0,05	≤0,025	≤0,025	≤0,2	≤0,009	≤0,15	≤0,2



Obr. 13. *Drátotah typu BAZ (OBX).*

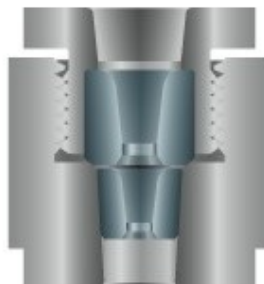
Proces povrchové úpravy před tažením se skládá z mechanického odokujování válcovaného drátu lámáním přes ohýbací kladky a následným kartáčováním přes spirálové kartáče.

Pro první úběr bylo použito vápenné mazivo, které má funkci nosiče a pro ostatní úběry mazivo sodné. Mýdla jsou sypána do boxů s mazivem a neustále promíchávána pomocí rotačních průvleků, aby nedošlo k jejich usazení a utuhnutí. Tento jev, kdy by tažený drát nebyl mazán, se zpravidla projevuje jeho zaostřením. Boxy s mazivem jsou instalovány před vstupem drátu do průvleku. Dodavateli mýdel pro Bekaert Bohumín s.r.o. jsou: Condat, Traxit a Lubrimetal.

5.1.1 Standardní průvleková sada

Standardní průvleková sada (dále sada 1), na které byla tažením zpracována první polovina válcovaného drátu je stanovena na 8 tahů a obsahuje na všech úběrech tlakové průvlekky. Další informace můžeme vyčíst z **tab. 6**. V průvlekových kazetách jsou tlakové

průvlaky uloženy před tažnými průvlaky (viz **obr. 14**). Aplikací tlakových průvleků dochází k vytvoření velkého tlaku a na drátu vznikne kompaktní vrstva maziva pro vstup do tažných průvleků.



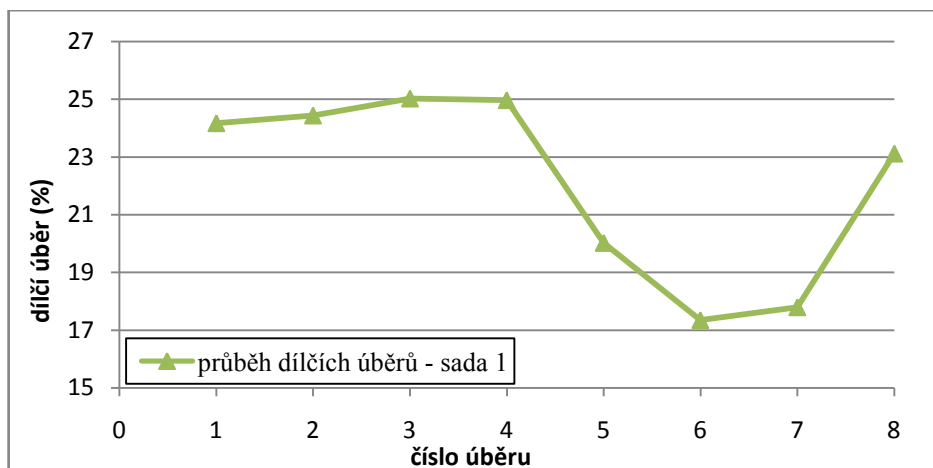
Obr. 14. *Uspořádání tlakového a tažného průvleku [14].*

Tab. 6. *Popis veličin pro vstup a jednotlivé úběry u sady 1.*

Č. úběru i	vstup	1	2	3	4	5	6	7	8
d_i (mm)	6,5	5,66	4,92	4,26	3,69	3,30	3,00	2,72	2,385
Q_{di} (%)		24,18	24,44	25,03	24,97	20,02	17,36	17,80	23,12
2α (°)		20	12	12	12	12	12	9	9
Δ_i (-)		2,51	1,49	1,45	1,46	1,87	2,20	1,60	1,18
Q_c (%)	86,54								

kde d je průměr drátu (mm)
 Q_d je dílčí úběr (%)
 2α je úhel tažné části průvleku (°)
 Δ je delta parametr (-)
 Q_c je celkový plošný úběr (%)

Grafické vyobrazení průběhu velikosti dílčích úběrů u sady1 vidíme na **obr. 15**.

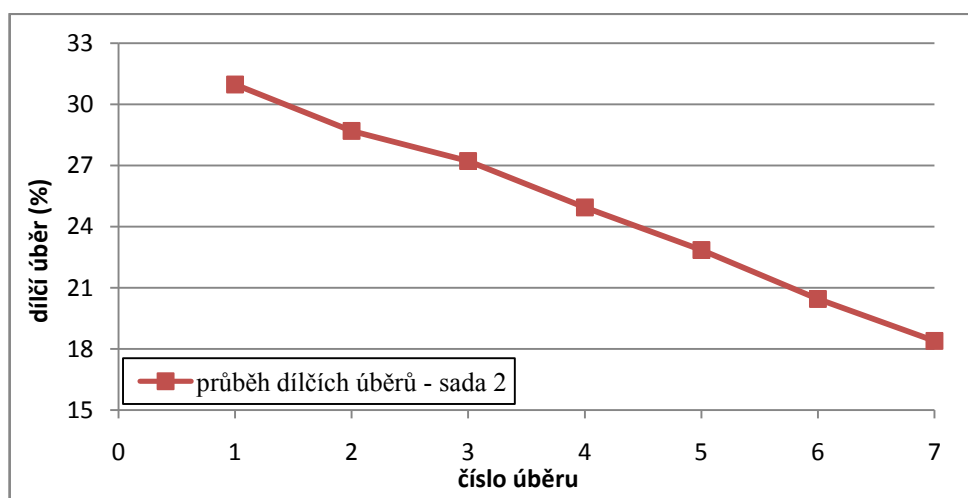


Obr. 15. *Průběh velikosti dílčích úběrů u sady 1.*

Z grafu můžeme konstatovat, že tato průvleková sada je nejprve mírně rostoucí, poté výrazně klesá a na závěr opět roste. Po předposlední tah se jedná o standardní průběh velikosti dílčích úběrů. Na posledním tahu se může dílič úběr změnit a to v závislosti na finálním požadovaném průměru. Průvlekové sady a jejich dílič úběry na jednotlivých tazích jsou totiž rozděleny do skupin podle rozmezí finálního rozměru.

5.1.2 Upravená průvleková sada

Upravená sada (dále sada 2), byla navržena s výraznou změnou dílčích úběrů. Došlo ke zvýšení dílič úběru hlavně v prvním a v menší míře i ve druhém a třetím tahu oproti sady 1. Celá se vyznačuje sestupným průběhem dílčích úběrů. Můžeme tedy konstatovat, že sada 2 je průvleková sada klesající (viz **obr. 16**).



Obr. 16. *Průběh velikosti dílčích úběrů u sady 2.*

Výsledný počet úběrů byl snížen o jeden, tedy na 7 tahů (viz **tab. 7**). Další výrazný zásah se týká prvního úběru, kde došlo ke změně tažného úhlu prův laku z důvodu snadnějšího vtahování maziva drátem do prův laku.

Na prvním tahu byl tlakový prův lak zachován. Na všechny ostatní úběry byly instalovány pouze tažné prův laky, tlakové prův laky nebyly použity.

Tab. 7. *Popis veličin pro vstup a jednotlivé úběry u sady 2.*

Č. úběru i	vstup	1	2	3	4	5	6	7
d_i (mm)	6,50	5,40	4,56	3,89	3,37	2,96	2,64	2,385
Q_{di} (%)		30,98	28,69	27,23	24,95	22,85	20,45	18,39
2α (°)		12	12	12	12	9	9	9
Δ_i (-)		1,13	1,24	1,32	1,46	1,21	1,37	1,51
Q_c (%)	86,54							

Již z velikosti hodnoty delta parametru hlavně v prvním úběru je zřejmé, že by tažení drátu touto sadou mělo vést k homogennějšímu průběhu plastické deformace po průřezu drátu.

6. VÝSLEDNÉ HODNOTY

6.1 Teplota

V průběhu tažení byly měřeny teploty drátu na tažných válcích (viz **tab. 8** a **tab. 9**), tedy před vstupem do dalšího průvlnku. Měření proběhlo pomocí infračerveného teploměru. Teplota byla snímána z horní části tažných válců, přímo za chodu stroje.

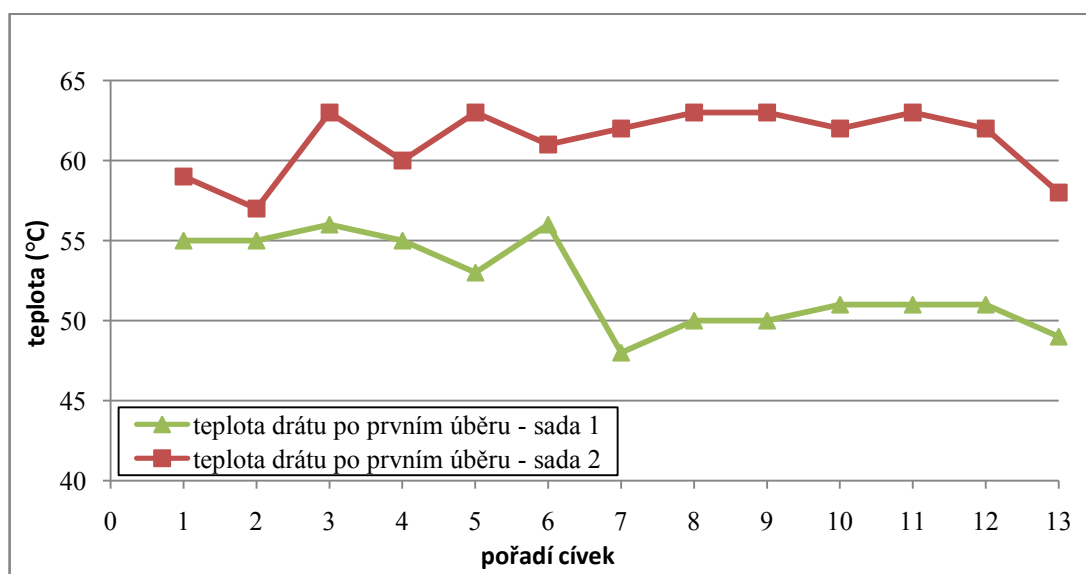
Tab. 8. *Teplota drátu na válcích při tažení přes sadu 1.*

	Teplota drátu (°C)							
	číslo úběru							
cívka	1	2	3	4	5	6	7	8
1	55	51	61	56	56	59	79	88
2	55	49	59	54	60	69	81	94
3	56	55	70	61	51	62	77	84
4	55	50	69	62	55	64	78	87
5	53	52	64	65	64	69	71	88
6	56	52	65	68	56	65	75	92
7	48	51	66	60	55	65	86	87
8	50	55	68	58	50	64	75	84
9	50	55	69	60	52	61	73	85
10	51	52	57	55	51	65	72	84
11	51	56	55	57	54	73	84	89
12	51	53	57	58	52	72	83	97
13	49	55	60	67	63	71	78	95

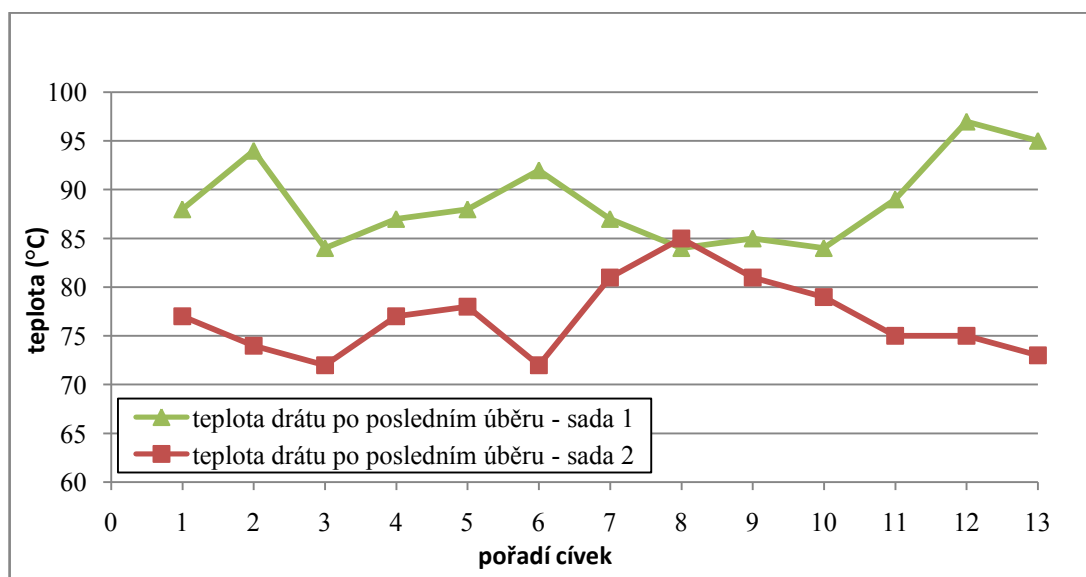
Tab. 9. *Teplota drátu na válcích při tažení přes sadu 2.*

	Teplota drátu (°C)						
	číslo úběru						
cívka	1	2	3	4	5	6	7
1	59	65	66	64	58	70	77
2	57	68	68	69	61	75	74
3	63	65	67	65	61	69	72
4	60	63	67	65	63	69	77
5	63	58	63	66	60	77	78
6	61	62	65	65	63	72	72
7	62	55	66	65	57	70	81
8	63	54	61	67	57	80	85
9	63	53	66	68	67	79	81
10	62	56	58	66	58	73	79
11	63	65	62	57	60	73	75
12	62	65	67	59	56	80	75
13	58	60	60	62	62	75	73

Při porovnávání teploty drátu můžeme sledovat, že došlo ke zvýšení teploty u sady 2. Důvod je zřejmý, a to změna dílčích úběrů. Hlavně po prvním tahu (viz **obr. 17**), kde došlo k navýšení Q_d z 24,18 %, na 30,98 %. Zvýšení teploty drátu při tažení není samozřejmě přínosem, avšak navýšené hodnoty teplot se stále pohybují v oblasti dobrých teplotních podmínek pro tažení. Naopak po posledním úběru, kde došlo ke snížení Q_d z 23,44% na 18,73% vykazuje teplota drátu na válcích hodnoty u sady 2 nižší, než u sady 1, což je pro technologii tažení příznivé (viz **obr. 18**).



Obr. 17. Teplota drátu po prvním úběru u sady 1 a sady 2.



Obr. 18. Teplota drátu po posledním úběru u sady 1 a sady 2.

6.2 Zbytkové mazivo

Množství zbytkového maziva jsem prováděl měřením ve firemní chemické laboratoři standardní metodou pro získání hmotnosti zbytkového maziva na drátě. Metoda vychází z postupného rozpouštění vrstvy maziva a vrstvy nosiče maziva v chemických roztocích.

Nejprve jsem na analytické váze s přesností na 0,0001 gramu zvážil vzorek drátu (hmotnost A). Poté jsem drát odmastil v diethyletheru a vzorek jsem opět zvážil (hmotnost B). Potom jsem drát ponořil do roztoku na odstranění maziv na 15 sekund. Po uplynutí uvedené doby jsem drát důkladně opláchl vodou a řádně osušil. Opět jsem provedl vážení s přesností na 0,0001 gramu (hmotnost C). Ze získaných hmotností jsem dle stanovených vzorců provedl výpočet hmotnosti maziva (hmotnost G_1) a výpočet hmotnosti nosiče maziva (hmotnost G_2). Nakonec jsem provedl konečný výpočet pro získání finální hmotnosti zbytkového maziva ze vzorce:

$$G_3 = G_2 + G_1 \quad (7)$$

Výsledné zbytkové mazivo je tedy rozdíl hmotnosti drátu před a po odstranění vrstvy (viz **tab. 10** a **tab. 11**).

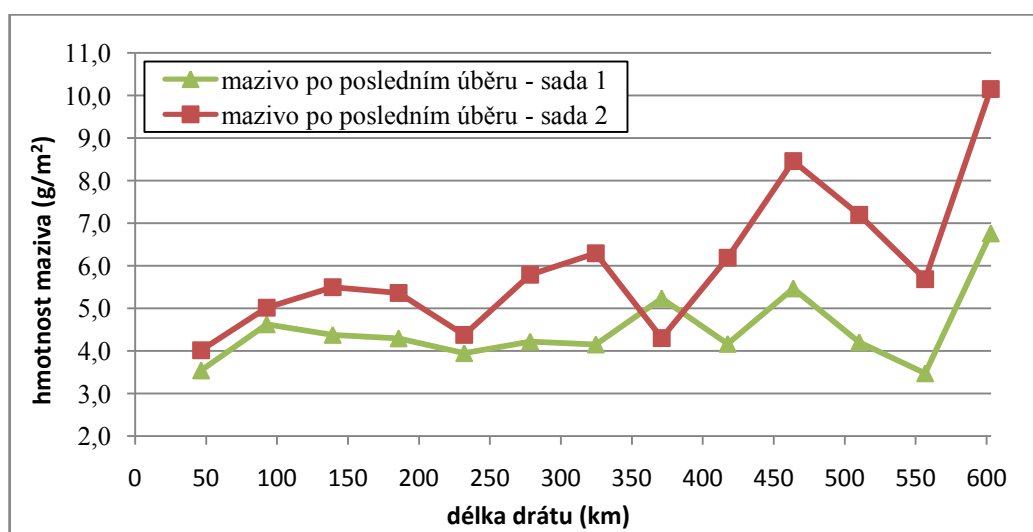
Tab. 10. Množství zbytkového maziva na drátu u sady 1.

Hodnoty zbytkového maziva (g/m ²)								
	číslo úběru							
cívka	1	2	3	4	5	6	7	8
1	7,77	8,85	5,50	5,28	4,82	3,90	3,39	3,54
2								4,63
3								4,38
4	10,33	9,74	8,04	8,30	5,84	5,03	6,77	4,30
5								3,95
6								4,22
7	12,98	9,32	7,71	7,98	6,02	6,16	5,64	4,15
8								5,24
9								4,16
10	11,83	9,36	9,66	7,45	7,41	7,07	5,75	5,47
11								4,21
12								3,47
13	9,17	11,98	11,50	8,29	8,27	6,98	9,52	6,76
průměr	10,41	9,85	8,48	7,46	6,47	5,83	6,21	4,50

Tab. 11. *Množství zbytkového maziva na drátu u sady 2.*

cívka	Hodnoty zbytkového maziva (g/m^2)						
	číslo úběru						
	1	2	3	4	5	6	7
1	15,37	8,26	6,68	6,42	5,17	5,17	4,01
2							5,01
3							5,50
4	16,31	8,78	11,22	7,78	6,25	6,75	5,36
5							4,38
6							5,79
7	13,69	10,90	9,54	8,26	5,91	6,29	6,29
8							4,30
9							6,19
10	21,35	11,09	8,88	9,34	9,62	7,66	8,46
11							7,20
12							5,68
13	20,34	12,93	15,47	10,11	7,88	11,78	10,15
průměr	17,41	10,39	10,36	8,38	6,96	7,53	6,03

Z výsledku je patrné, že došlo ke zvýšení maziva hlavně po prvním úběru při tažení přes sadu 2. Příčinou může být změna velikosti tažného úhlu 2α u prvního průvlnku, případně další vlivy např. povrchová drsnost drátu, či rozdílný dílčí úběr. Po posledním úběru (viz **obr. 19**) můžeme také pozorovat navýšení zbytkového maziva na drátě taženém přes sadu 2, a to hlavně po určité době tažení (cca po natažení 460 km drátu) kdy již bylo znát určité opotřebení průvlnku.

**Obr. 19.** *Hmotnost zbytkového maziva na drátě po posledním úběru u sady 1 a sady 2.*

Pro další pracovní proces je důležitá přítomnost zbytkové mazivo po posledním úběru, neboť jeho množství může omezit následné užití drátu. V našem případě se jedná o proces tepelného zpracování v olovu. Musíme brát na vědomí, že je-li náběr zbytkového maziva větší než 10 g/m^2 hrozí nebezpečí nedokonalého spálení maziva a vzniku povrchových vad, tzv. černých fleků. Bude-li náběr zbytkového maziva menší než 4 g/m^2 může docházet k vynášení olova na povrchu drátu. Ideální náběr zbytkového maziva se tedy pohybuje v rozmezí cca od 4 do 10 g/m^2 . Hodnoty průměrů zbytkového maziva po posledním úběru o obou sad jsou ve zmíněné toleranci. U sady 2 se dokonce blíží středu tohoto rozmezí. Zarážející jsou vysoké hodnoty zbytkového maziva po prvním úběru u sady 2.

6.3 Průměr (opotřebení sady)

Vstupním materiálem byl válcovaný drát o průměru 6,50 mm a finální rozměr byl požadován 2,385 mm s určitým intervalem rozpětí dle specifikace. Měření jsem prováděl tisícinovým mikrometrem po každém úběru v určitém horizontu nataženého drátu. Opotřebení sady nebylo nijak výrazné, pouze rozměr průvlnku posledního úběru se po natažení asi 11 cívek (cca 510 km drátu) přiblížil horní hranici požadované tolerance a při tažení poslední cívky bylo již toto požadované kritérium překročeno. V průběhu celého experimentu nedošlo k výměně finálního, či jiného průvlnku. Výsledky měření můžeme vyčíst z **tab. 12** a **tab. 13**.

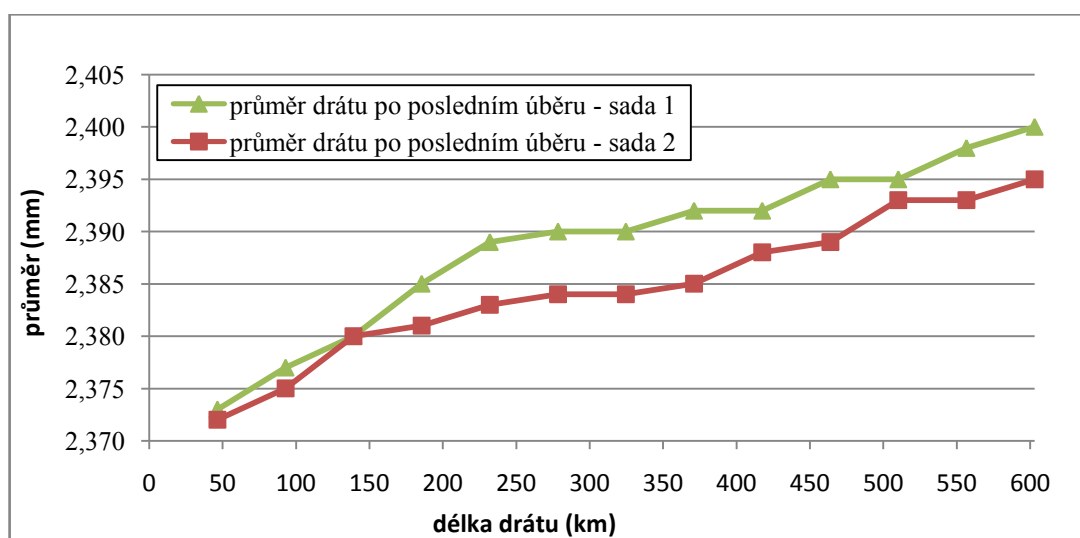
Tab. 12. *Průměr drátu u sady 1.*

Průměr drátu (mm)									
	číslo úběru								
cívka	vstup	1	2	3	4	5	6	7	8
1	6,50	5,62	4,89	4,24	3,67	3,28	2,99	2,71	2,373
2	6,50	5,62	4,89	4,24	3,67	3,29	3,00	2,71	2,377
3	6,50	5,62	4,89	4,24	3,68	3,29	3,00	2,71	2,380
4	6,50	5,62	4,90	4,25	3,68	3,29	3,00	2,72	2,385
5	6,50	5,62	4,90	4,25	3,68	3,29	3,01	2,72	2,389
6	6,50	5,62	4,90	4,25	3,68	3,30	3,01	2,72	2,390
7	6,50	5,63	4,90	4,25	3,68	3,30	3,01	2,72	2,390
8	6,50	5,63	4,90	4,25	3,69	3,30	3,01	2,72	2,392
9	6,50	5,63	4,90	4,25	3,69	3,30	3,01	2,72	2,392
10	6,50	5,63	4,91	4,26	3,69	3,30	3,01	2,72	2,395
11	6,50	5,64	4,91	4,26	3,69	3,31	3,02	2,73	2,395
12	6,50	5,64	4,91	4,26	3,69	3,31	3,02	2,73	2,398
13	6,50	5,64	4,91	4,26	3,69	3,31	3,02	2,73	2,400
medián	6,50	5,63	4,90	4,25	3,68	3,30	3,01	2,72	2,390

Tab. 13. *Průměr drátu u sady 2.*

Průměr drátu (mm)								
	číslo úběru							
cívka	vstup	1	2	3	4	5	6	7
1	6,50	5,36	4,54	3,87	3,36	2,95	2,62	2,372
2	6,50	5,36	4,54	3,87	3,36	2,96	2,63	2,375
3	6,50	5,36	4,54	3,88	3,36	2,96	2,63	2,380
4	6,50	5,36	4,55	3,88	3,37	2,96	2,64	2,381
5	6,50	5,36	4,55	3,88	3,37	2,96	2,64	2,383
6	6,50	5,37	4,55	3,88	3,37	2,96	2,64	2,384
7	6,50	5,37	4,55	3,89	3,37	2,96	2,64	2,386
8	6,50	5,37	4,55	3,89	3,37	2,96	2,65	2,385
9	6,50	5,37	4,55	3,89	3,37	2,96	2,65	2,388
10	6,50	5,37	4,56	3,89	3,37	2,97	2,65	2,389
11	6,50	5,37	4,56	3,89	3,37	2,97	2,65	2,393
12	6,50	5,38	4,56	3,89	3,37	2,97	2,66	2,393
13	6,50	5,38	4,56	3,90	3,38	2,97	2,66	2,395
medián	6,50	5,37	4,55	3,89	3,37	2,96	2,64	2,384

V grafu na **obr. 20** vidíme, že prvotní zatáhnutí finálních průvlastků u obou průvlastkových sad je obdobné. Následné otevírání průvlastku bylo intenzivnější u sady 1 a to v oblasti tažení cívek číslo 4 a 5 (139 - 232 km drátu). Poté už můžeme konstatovat rovnoměrný průběh opotřebení finálního průvlastku sady 1. U sady 2 je větší růst opotřebení v oblasti tažení cívky číslo 3. Dále již je průběh také rovnoměrný. Opotřebení průvlastků na všech úběrech při tažení drátu u obou průvlastkových sad bylo minimální, bez výrazných skokových změn.

**Obr. 20.** *Průměr drátu po posledním úběru sady 1 a sady 2.*

6.4 Pevnost v tahu

Pevnost materiálu jsem zkoušel statickou zkouškou tahem ve firemní mechanické zkušebně na trhačím zařízení s možností deformace materiálu silou do max. 20 000N (viz **obr. 21**). Statická zkouška tahem probíhá plynulým zatěžováním zkoušeného vzorku stanovenou rychlostí až do přetržení. [4]



Obr. 21. *Trhač stroj pro zkoušku tahem.*

Pro výpočet pevnosti v tahu z naměřených hodnot při zkoušení na trhačím zařízení, jsem použil vzorec:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (8)$$

kde R_m je pevnosti v tahu (MPa)

F_m je maximální síla (N)

S_0 je počáteční průřez materiálu (mm²)

Hodnoty pevnosti drátu tažených přes sadu 1 a sadu 2 jsou vyjádřeny v **tab. 14** a v **tab. 15**.

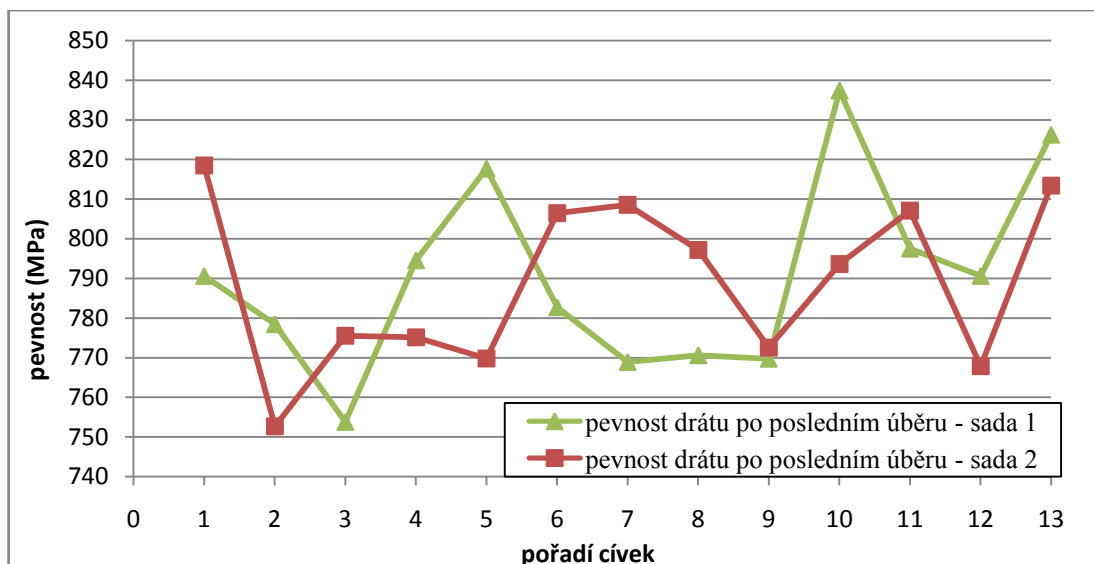
Tab. 14. *Naměřené hodnoty pevnosti v tahu u drátu taženého přes sadu 1.*

Hodnoty pevnosti v tahu (MPa)								
	číslo úběru							
cívka	1	2	3	4	5	6	7	8
1	490	541	583	649	683	725	736	791
2								778
3								754
4	474	570	616	633	654	694	723	795
5								818
6								783
7	506	576	588	666	689	715	746	769
8								771
9								770
10	531	572	639	701	742	753	755	837
11								798
12								791
13	530	575	639	669	707	756	761	826

Tab. 15. *Naměřené hodnoty pevnosti v tahu u drátu taženého přes sadu 2.*

Hodnoty pevnosti v tahu (MPa)							
	číslo úběru						
cívka	1	2	3	4	5	6	7
1	554	598	695	726	741	817	819
2							753
3							776
4	508	588	665	668	711	729	775
5							770
6							806
7	514	620	672	706	776	807	809
8							797
9							773
10	554	607	685	693	786	783	794
11							807
12							768
13	542	621	689	721	775	813	813

Z grafu **obr. 22** je patrné, že se finální pevnost materiálu taženého přes sadu 1 a sadu 2 pohybuje v oblasti podobných hodnot. Hodnoty pevnosti u sady 2 se pohybují v menším rozmezí než u sady 1.

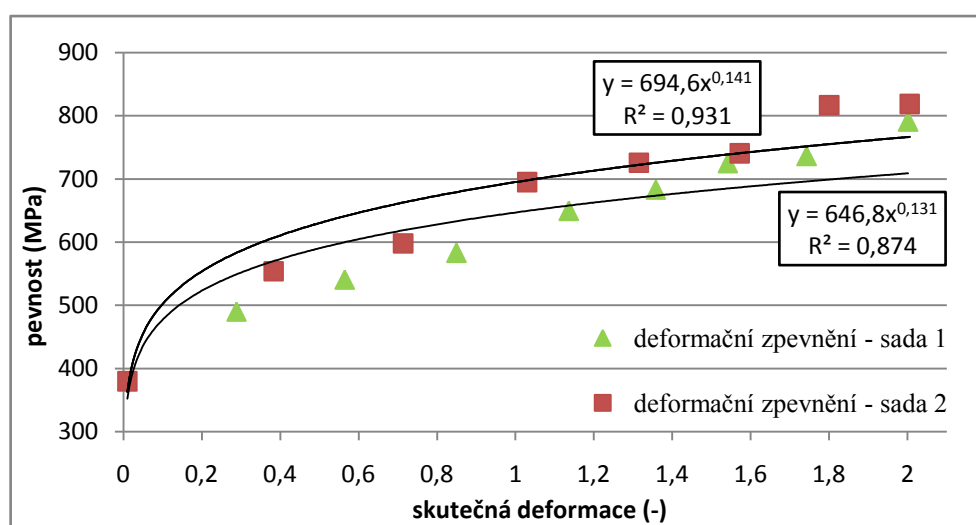


Obr. 22. Pevnost v tahu po posledním úběru u sady 1 sady 2.

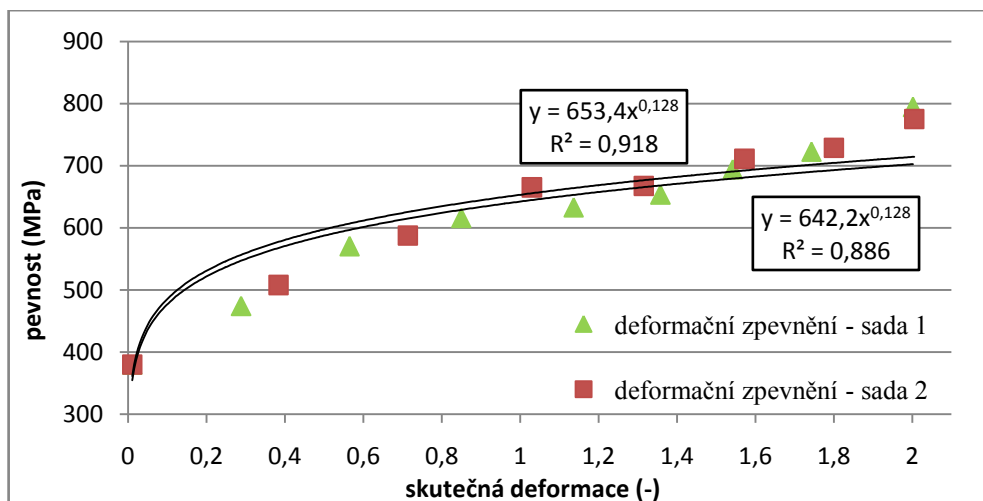
Z hlediska tažení je určitě mnohem zajímavější průběh deformačního zpevnění.

Obecně můžeme proces zpevnění drátu popsat jako důsledek odporu struktury proti plastické deformaci, která je vyvolaná určitým napětím. Nízkouhlíkové ocelové dráty mají feritickou strukturu s mírným podílem cementitu, což umožňuje jejich vysokou tvařitelnost a jejich zpevnění je relativně malé [4].

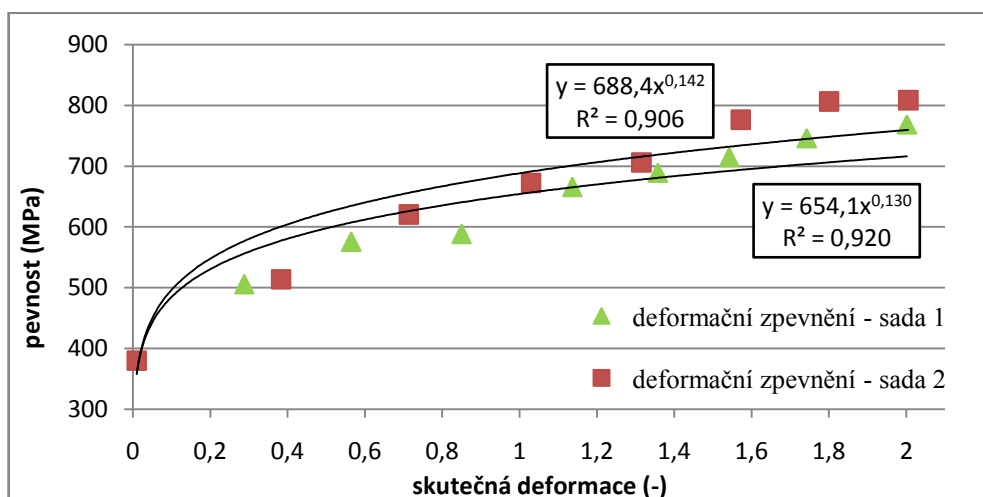
V našem případě můžeme pozorovat růst deformačního zpevnění v závislosti na skutečné deformaci při tažení drátu přes obě varianty průvlekových sad na **obr. 23, 24, 25, 26, 27**.



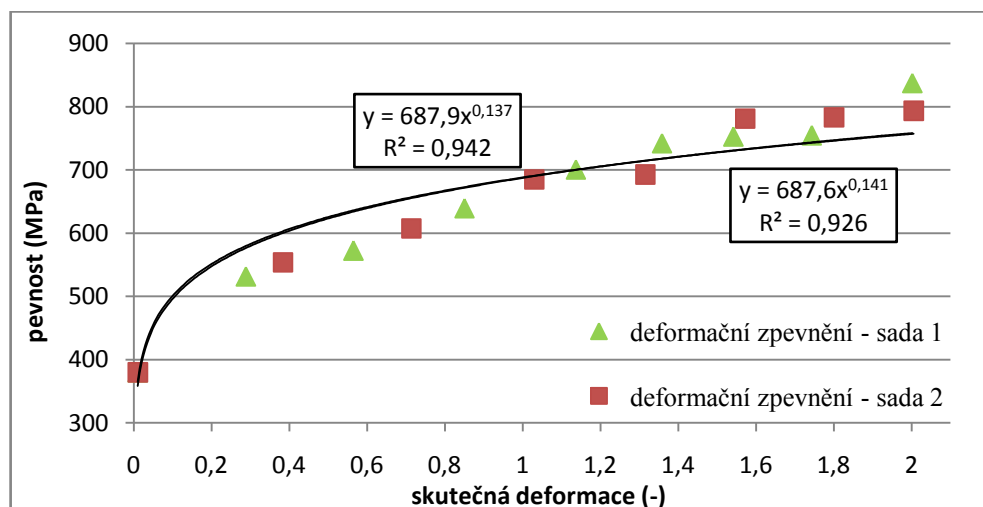
Obr. 23. Deformační zpevnění drátu v průběhu tažení (cívka č. 1).



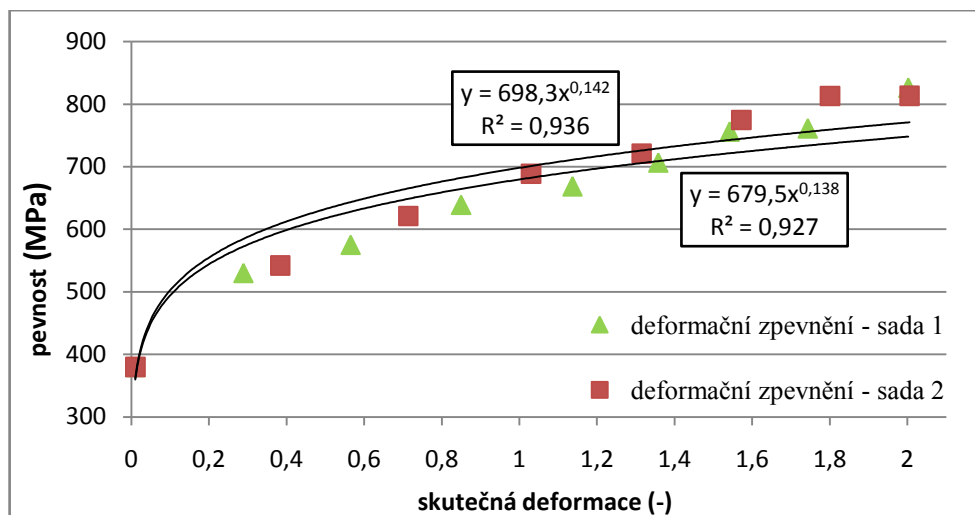
Obr. 24. Deformační zpevnění drátu v průběhu tažení (cívka č. 4).



Obr. 25. Deformační zpevnění drátu v průběhu tažení (cívka č. 7).



Obr. 26. Deformační zpevnění drátu v průběhu tažení (cívka č. 10).



Obr. 27. Deformační zpevnění drátu v průběhu tažení (cívka č. 13).

6.5 Kruty

Zkoušku drátu kroucením jsem prováděl také ve firemní mechanické zkušebně na krouticím stroji. Zkouška spočívá ve zkrucování testovaného vzorku drátu kolem vlastní osy, dokud nedojde k lomu. Detail lomu (viz **obr. 28**). Počet krutů do lomu zaznamenává počítadlo krouticího stroje. Délka testované části vzorku a rychlost kroucení se dle normy stanovuje podle průměru materiálu (viz **tab. 16**).



Obr. 28. Pohled na lom drátu při zkoušce krutem.

Tab.16. *Zkoušení délky a rychlosti drátu kruhových průřezů.*

Průměr d (mm)		Zkušební délka L_z (mm)	Nejvyšší rychlost otáčení N_o (otáčky.sekunda ⁻¹)
od	pod		
0,3	1,0	200 d	3,0
1,0	5,0	100 d	1,0
5,0		50 d	0,5

Počet krutů je měřítkem houževnatosti materiálu. Zkouška krutem je rozhodující pro hodnocení funkční způsobilosti drátu, které jsou provozně torzně namáhané.

Podmínky zkoušky se v závislosti na průměru drátu mění skokem, konkrétně testovaná délka vzorku L_z . Změna vlastnosti materiálu by měla mít monotónní průběh. Proto pro porovnání počtu krutů z různých zkušebních délek je nutno použít smykovou deformaci do lomu γ , která charakterizuje daný materiál a vyjadřuje se vztahem:

$$\gamma = \frac{\pi \cdot d \cdot N_t}{L_z} \quad (9)$$

kde d je průměr drátu (mm)

N_t je počet krutů (-)

L_z je délka testovaného vzorku (mm)

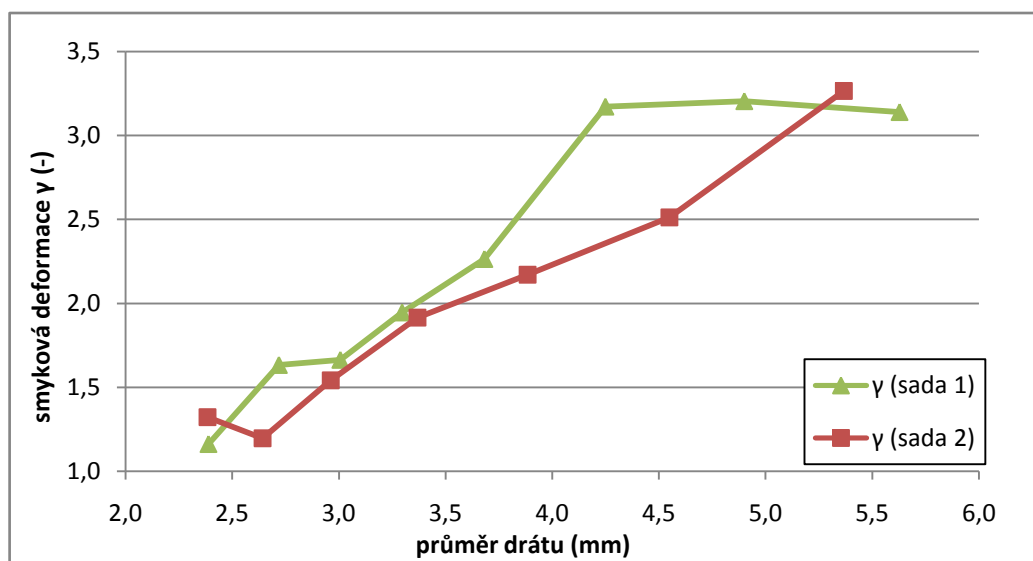
Výsledný počet krutů vyjádřen smykovou deformací do lomu γ je lineárně závislý na délce testovaného vzorku. Tato závislost je ve skutečnosti parabolická a počty krutů jsou tedy menší [13].

Z mediánů průměrů drátu a mediánů počtu krutů po jednotlivých úběrech u sady 1 a 2 jsem si vyjádřil hodnoty γ , které vidíme v **tab. 17**.

Tab. 17. *Hodnoty smykové deformace do lomu γ po jednotlivých úběrech u sady 1 a 2.*

Číslo úběru	1	2	3	4	5	6	7	8
Hodnota γ (sada 1)	3,140	3,205	3,173	2,263	1,946	1,663	1,633	1,162
Hodnota γ (sada 2)	3,265	2,513	2,170	1,915	1,540	1,195	1,322	

Obr. 29 vyjadřuje vzájemnou závislost hodnot smykové deformace do lomu γ a průměru sady 1 a sady 2.



Obr. 29. Vyjádření závislosti smykové deformace do lomu γ na průměru v průběhu tažení.

Reálné výsledky zkoušek kroucením naměřené po jednotlivých úběrech na příslušných délkách testovaného vzorku lze vyčíst z **tab. 18** a **tab. 19**.

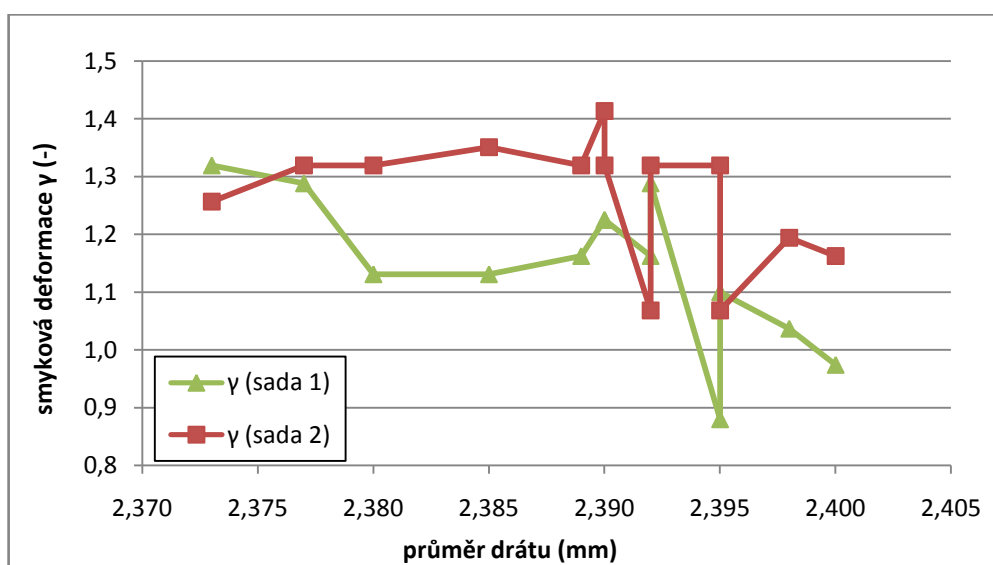
Tab. 18. Naměřené hodnoty krutů u drátu taženého přes sadu 1.

cívka	počet krutů (-)							
	číslo úběru							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	49	107	95	73	60	53	54	42
2								41
3								36
4	62	106	103	72	60	51	51	36
5								37
6								39
7	65	102	101	64	62	66	71	39
8								37
9								41
10	50	102	97	70	64	50	43	28
11								35
12								33
13	49	91	111	72	63	56	52	31
medián	50	102	101	72	62	53	52	37

Tab. 19. Naměřené hodnoty krutů u drátu taženého přes sadu 2.

cívka	počet krutů (-)						
	číslo úběru						
	1	2	3	4	5	6	7
1	52	95	75	62	48	38	40
2							42
3							42
4	52	70	69	67	49	44	43
5							42
6							45
7	52	111	65	59	49	38	42
8							34
9							42
10	48	72	68	61	55	36	42
11							34
12							38
13	51	80	71	60	51	37	37
medián	52	80	69	61	49	38	42

Zkouška krutem je nejtvrďší mechanickou zkouškou a počet krutů je měřítkem houževnatosti materiálu. Výsledný počet krutů po posledním úběru u sady 1 a 2, který jsem vyjádřil pomocí smykové deformace do lomu γ , je znázorněn na grafu (viz **obr. 30**).

**Obr. 30.** Smyková deformace do lomu γ po posledním úběru u sady 1 a sady 2.

7. ZÁVĚR A PROVOZNÍ DOPORUČENÍ

Cílem bakalářské práce bylo porovnat hodnoty naměřené v průběhu tažení na průvlnkových sadách 1 a 2 a z vyhodnocení těchto naměřených hodnot zjistit, je-li možno bez obav v technologické praxi dále používat námi navržené úpravy průvlnkové sady. Výsledné hodnoty, které jsem porovnával, se týkají teploty a průměru taženého drátu, hmotnosti zbytkového maziva na drátě a mechanických vlastností v podobě pevnosti a houževnatosti drátu.

Na základě analýzy výsledků můžu konstatovat, že cíle byly splněny a upravená průvlnková sada bude zařazena do výroby pro tažení nízkouhlíkových drátů.

Z vyhodnocení naměřených výsledků můžeme učinit tyto závěry.

Při porovnání opotřebení obou průvlnkových sad nedošlo u sady 2 k výraznějšímu opotřebení průvlnků, spíše naopak. Nepřítomnost tlakových průvlnků tedy nijak neovlivnila opotřebení tažných průvlnků. Teplota drátu se zvýšila po tazích, kde se navýšily dílčí úběry a naopak po tazích, kde se dílčí úběry snížily, její hodnoty klesaly. Abychom teploty po tazích, kde došlo k jejich navýšení dokázali snížit, museli bychom instalovat intenzivnější chlazení. Pro tažení je ovšem nárůst teplot, který činí cca 10 %, stále dostačující. U náběru zbytkového maziva je vidět zvýšení náběru u všech tahů celé sady 2. Vše je zřejmě dáno snížením tažného úhlu 2α u prvního tahu sady 2, kde došlo téměř k 58 %nímu nárůstu hmotnosti zbytkového maziva, který ovlivnil náběr maziva i na dalších tazích. Tento nepříznivý jev bude nutno vyřešit použitím tažného průvlnku s původního velikosti úhlu 2α , nebo odebráním tlakového průvlnku i z prvního tahu. Zkoušení mechanických vlastností drátu proběhlo zkouškou pevnosti a houževnatosti. Naměřené hodnoty pevnosti ukazují, že v této oblasti nedošlo k žádným výrazným rozdílům, což vidíme na deformačním zpevnění jednotlivých cívek. Podobné průběhy deformace dokazují, že použitý materiál byl stejných vlastností a po tažení tomu tak z hlediska pevnosti zůstalo. U zkoušky krutů do lomu (houževnatost materiálu) musíme posuzovat hodnoty vypočtené smykové deformace do lomu γ . Ze závislosti smykové deformace do lomu na průměru vidíme větší úbytek houževnatosti drátu v průběhu tažení u sady 2 hlavně v úběrech, kde došlo k navýšení dílčích úběrů. V posledním úběru vidíme naopak větší úbytek houževnatosti drátu u sady 1, což je dáno zmenšením dílčího úběru u sady 2.

Závěrem lze podotknout, že nepřítomnost tlakových průvlastků výrazně neovlivnila žádnou z měřených vlastností. Výjimkou může být hmotnost zbytkového maziva, ale tento jev bude zapotřebí ještě odzkoušet. Naopak změna dílčích úběrů a tím snížení počtu tahů se projevila zlepšením houževnatosti materiálu po posledním úběru.

Snížení počtu tahů a nepřítomnost tlakových průvlastků bude z dlouhodobého hlediska zjevným finančním přínosem.

Doporučuji pokračovat v experimentu s použitím upravené sady, u které je nutné udělat ještě menší úpravy na prvním tahu z důvodu snížení množství zbytkového maziva na drátě hlavně po prvním úběru. Navrhuji vyzkoušet provozní experiment také na materiálu s vyšším procentuálním obsahem uhlíku.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Stránky firmy Bekaert.* [online]. 2013. [cit. 2013-04-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.bekaert.com>>.
- [2] MARCOL, J., *Tažený ocelový drát pro vaše užití.* Bohumín: ŽDB a. s., 1998. 157 s.
- [3] *Fakulta strojní. Technická univerzita Liberec. Technologie II – tváření kovů, zpracování plastů. Kapitola 4 Technologie objemového tváření - Tažení drátů a profilů.* [online]. 2013. [cit. 2013-04-06]. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/04.htm>.
- [4] MARCOL, J. a kolektiv, *Tažený ocelový drát 1. a 2. díl.* Bohumín: ŽDB a. s., 1996. 500 s.
- [5] BAČA, M., MORAVEC, E., *Příspěvek k problematice teorie tažení drátu.* Hutnické aktuality. Dobrá u Frýdku-Místku: VÚHŽ, účelová organizace, 1987. 41 s. ISSN 0322-8525.
- [6] ŁUKSZA, J., SADOK, L., *Wybrane zagadnienia z ciagarnstwa.* 1. Vyd. Kraków : AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. S. STASZICA, 1983. 185 s.
- [7] MARCOL, J., *Příspěvek k problematice výroby ocelového drátu.* Hutnické aktuality. Dobrá u Frýdku-Místku: VÚHŽ a. s., 1992. 68 s. ISSN 0322-8525.
- [8] FABÍK, R., *Studijní opora. Vybrané kapitoly z tváření kovu - tažení kap. 1-5.* [online]. 2008. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.fmfi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fmfi/cs/okruhy/urceno-pro/studenty/podklady-ke-studiu/studijni-opory/633-Fabik-Vybrane-kapitoly-z-tvareni-kovu-kap-1-5.pdf>>.
- [9] FABÍK, R., *Tváření kovu – učební text.* [online]. 2012. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TVKB/Tvareni%20kovu.pdf>>.
- [10] *Stránky společnosti Antaac.* [online]. [cit. 2013-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.antaac.org.mx/descargas/TheoryOfWiredrawing.pdf>>.
- [11] ENGHANG, P., *Steel wire technology, Materialtechnik HB.* 2008. 311 s. ISBN 91-631-1962-5.

- [12] MCALLEN, P, J., PHELAN, P., Numerical analysis of axisymmetric wire drawing by means of a coupled damage model. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 183, s. 210–218.
- [13] MARCINIAK, J., MORAVEC, E., *Zkoušení drátu*. Hutnické aktuality. Dobrá u Frýdku-Místku: VÚHŽ, účelová organizace, 1989. 87 s. ISSN 0322-8525.
- [14] *Stránky společnosti Paramount Die*. [online]. 2013. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z WWW: < <http://www.paradie.com/ProductsPIH.html> >.